



**ÂNGELA MARIA  
ALVES PEREIRA  
MARTINS**

**Avaliação e Análise dos Fluxos Energéticos da  
ETAR Sul e ETAR Norte da SIMRIA**



**ÂNGELA MARIA  
ALVES PEREIRA  
MARTINS**

**Avaliação e Análise dos Fluxos Energéticos da ETAR Sul e  
ETAR Norte da SIMRIA**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor Vítor António Ferreira da Costa, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e sob a co-orientação científica do Doutor Jorge Mendonça e Costa, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Como auxílio à realização desta dissertação, foi realizado um estágio com a duração de cinco meses, na SIMRIA S.A. – Saneamento Integrado dos Municípios da Ria de Aveiro, sob a orientação do Eng.º Milton Fontes.

Dedico este trabalho aos meus pais, tia e avô.

## **o júri**

Presidente

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar  
Professor Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento da  
Universidade de Aveiro

Prof. Especialista João Antero Nascimento dos Santos Cardoso  
Professor associado da Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior  
de Engenharia de Lisboa

Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa, C/ Agregação,  
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro  
Professor associado da C/ Agregação, Departamento de Engenharia  
Mecânica da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Aos Professores Doutor Vítor António Ferreira da Costa e Doutor Jorge Mendonça e Costa, pela orientação científica e sentido crítico, pela constante disponibilidade e amizade.

Ao Eng.º Milton Fontes da SIMRIA e a toda a equipa da ETAR Sul.

Ao Alex.

Muito Obrigada.

**palavras-chave**

Cogeração, ETAR, Fluxos Energéticos, Proposta de Melhorias

**resumo**

A cogeração é a solução técnica disponível para produzir energia elétrica e térmica de forma combinada com a melhor eficiência, mediante a queima de um combustível, seja ele de origem fóssil ou de natureza renovável.

Este trabalho tem como objetivo fazer o levantamento e a descrição das instalações de cogeração das ETAR - Sul e Norte, detidas pela empresa SIMRIA - Saneamento Integrado dos Municípios da Ria de Aveiro, S.A., bem como dos processos de tratamento inerentes para o seu correto funcionamento, a avaliação dos fluxos energéticos e a sua análise crítica.

Para tal realizou-se uma inventariação e consequente compilação dos dados referentes aos fluxos energéticos existentes em cada ETAR para o ano de 2013, ou seja, procedeu-se à análise da produção e do consumo de energia elétrica, produção e consumo de energia térmica, produção e consumo de biogás, consumo de gás natural e queima de biogás na tocha. Esta análise teve como intuito identificar e quantificar os fluxos energéticos existentes. Bem como conhecer as necessidades energéticas de cada ETAR e a sua atual gestão.

Com este estudo foi possível realizar uma análise energética completa dos fluxos de energia para um dia típico de Verão e de Inverno e respetivos modos de aproveitamento, ou seja, das diferentes formas de gestão dos recursos disponíveis e das suas variações ao longo do ano.

Para efeitos comparativos e de discussão foram também equacionados três cenários de produção de energia elétrica e térmica a partir da queima do biogás. Dois destes cenários contemplam a produção de energia elétrica e visam aproveitar a potência nominal de produção de cada motogerador. Contudo, por motivos legais a potência elétrica encontra-se limitada a 250 kW – regime de miniprodução. O terceiro cenário tem como intuito analisar o potencial de produção de energia elétrica e energia térmica de maneira a que todo o biogás produzido seja utilizado.

Para validar os estudos efetuados aos diversos fluxos de energia, e tendo em consideração as necessidades energéticas de cada ETAR é feita uma análise crítica, onde são apresentadas várias propostas de melhoria que visam o melhor aproveitamento das diversas formas de energia geradas.





**keywords** Cogeneration, WWTP, Energy Flows, Proposed Improvements.

**abstract** Cogeneration is the technical solution available to produce electrical and thermal energy with the best efficiency by burning a fossil or renewable fuel. This paper has the purpose of doing the description of the cogeneration facilities of the WWTP - South and North, held by the company SIMRIA- Integrated Sanitation of Municipalities of the *Ria de Aveiro*, S.A., such as the processes of wastewater treatment for it to work correctly. In this work we carried out a survey and subsequent compilation data regarding to the existing energy flows in each WWTP for the year 2013, ie, the analysis of the production and consumption of electricity, production and consumption of thermal energy, biogas production and consumption, consumption of natural gas and the amount of biogas being burned in the torch.

This analysis was aimed to quantify and identify the energy flows, as well as meet the energy needs of each WWTP and the current management of these resources.

With this study it was also possible to establish a complete energy analysis of the energy flows for a typical day of summer and winter and respective modes of utilization, ie, the different ways of managing the available resources and their variations over the year.

For comparison and discussion three scenarios were also equated for the production of electrical and thermal energy from the combustion of biogas. Two of these scenarios include the production of electricity and aim to take advantage of the rated power output of each power generator.

However, for legal reasons the electrical power is limited to 250 kW – system of miniproduction. The third scenario is meant to examine the potential of production of electricity and thermal energy so that all biogas produced is used.

To validate the studies performed to the different energy flows, and taking into account the energy needs of each WWTP, several proposals which aim improving the overall utilization of various forms of energy generated were presented.

# Índice

Lista de Figuras .....	1
Lista de Tabelas .....	2
Lista de Siglas .....	3
1. Introdução .....	5
1.1 Relevância do tema .....	6
1.2 Motivação .....	6
1.3 Problema a resolver e qual a sua importância.....	7
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Abordagem/metodologia de ataque/estudo exploratório .....	7
2 Estado da arte/enquadramento teórico .....	9
2.2 O biogás - valorização energética dos resíduos orgânicos .....	14
2.2.1 Produção de biogás.....	15
2.3 Enquadramento legal .....	16
2.3.1 Enquadramento legal miniprodução .....	16
2.3.2 Enquadramento legal da cogeração .....	18
2.3.3 Enquadramento legal - ETAR a estudar .....	19
2.4 Cogeração .....	19
2.4.1 Tecnologias de cogeração.....	23
2.4.2 Tipos de tecnologias de cogeração.....	24
2.4.2.1. Turbina a vapor .....	25
2.4.2.2 Turbina a gás .....	27
2.4.2.3 Motor Alternativo de combustão interna.....	29
2.4.2.4 Ciclo Otto .....	31
2.4.2.5 Ciclo Diesel.....	32
2.5 Indicadores de eficiência de uma central de cogeração .....	34
2.5.1 Eficiência energética.....	34
2.5.2 Eficiência térmica e eficiência elétrica.....	34
2.5.3 Eletricidade produzida.....	35
2.5.4 Poupança de energia primária .....	35
2.6 Quantificação dos fluxos vs índices de desempenho de uma central de cogeração .....	36
3. Casos de estudo .....	39
3.1 Caso de estudo A – ETAR Sul .....	40

3.1.1 Breve descrição .....	40
3.1.2 Diagrama de fluxo .....	41
3.1.3 Inventariação/avaliação dos fluxos .....	46
3.1.4 Compilação de dados para um ano .....	52
3.4.1.1 Fluxo energético: energia elétrica .....	54
3.4.1.2 Renumeração de compra e venda de energia elétrica .....	57
3.4.1.3 Fluxo energético – energia primária utilizada na ETAR.....	59
3.4.1.4 Fluxo energético – energia térmica .....	62
3.1.5 Compilação de dados para um dia típico de Inverno e de Verão .....	67
3.2 Caso de estudo B – ETAR Norte .....	71
3.2.1 Breve descrição .....	71
3.2.2 Diagrama de fluxo .....	72
3.2.3 Inventariação/avaliação dos fluxos .....	76
3.2.4 Compilação de dados para um ano .....	81
3.2.4.1 Fluxo Energético: Energia Elétrica.....	82
3.2.4.2 Remuneração de compra e venda de energia elétrica .....	85
3.2.4.3 Fluxo energético – Energia primária utilizada .....	87
3.2.4.4 Fluxo energético – energia térmica .....	91
4. Proposta de melhoria .....	99
4.1 Proposta de melhoria – Caso de estudo A – ETAR Sul .....	99
4.1.1 Fluxo energético – energia térmica .....	100
4.1.2 Fluxo energético – biogás .....	104
4.2 Proposta de melhorias – Caso de Estudo B – ETAR Norte .....	106
4.2.1 Fluxo energético – energia térmica .....	106
4.2.3 Fluxo energético – biogás .....	110
5. Conclusões e propostas de trabalhos futuros .....	113
6. Bibliografia.....	115
Anexo 1 .....	118
Anexo 2 .....	119
Anexo 3 .....	120
Anexo 4 .....	122
Anexo 5 .....	124
Anexo 6 .....	126

## Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama funcional típico de uma ETAR. [7].....	14
Figura 2 - Principais opções/conversão de biogás. [9] .....	15
Figura 3 - Distribuição das centrais de cogeração por setores em 1990. [12].....	20
Figura 4 - Representação esquemática do conceito de cogeração. [12] .....	21
Figura 5 -Representação esquemática de uma instalação de cogeração. [12] .....	22
Figura 6 – Produção de energia elétrica em Portugal em 2012. [4] .....	23
Figura 7 - Representação esquemática em diagrama T- s do ciclo de <i>Rankine</i> . [17].....	25
Figura 8- Representação esquemática dos elementos do ciclo de <i>Rankine</i> . [17] .....	26
Figura 9 - Instalação de cogeração ideal com turbina de vapor. [17].....	27
Figura 10 - Representação esquemática em diagrama T- s do ciclo de <i>Brayton</i> . [17] .....	27
Figura 11 - Representação esquemática dos elementos do ciclo de <i>Brayton</i> . [17] .....	28
Figura 12 - Instalação de cogeração que opera com turbina a gás em ciclo simples. [3]....	29
Figura 13 - Sistema biela-manivela. [18] .....	30
Figura 14 - Pontos mortos superior e inferior do motor. [18] .....	30
Figura 15 - Os 4 tempos do motor de ignição comandada. [18] .....	32
Figura 16 - Os 4 tempos do motor de ignição por compressão. [18] .....	33
Figura 17 -ETAR Sul. [23].....	41
Figura 18 - Diagrama simplificado do sistema de cogeração.....	43
Figura 19 - Composição do biogás produzido na ETAR Sul. ....	52
Figura 20 - Representação dos dados referentes à produção, consumo e possíveis cenários de produção de energia elétrica a partir do sistema de cogeração.....	54
Figura 21 – Fluxos Financeiros associados à venda e compra de energia elétrica.....	57
Figura 22 - Representação gráfica da energia primária utilizada na ETAR. ....	59
Figura 23 - Indicação do n.º de horas/dia de funcionamento do motogerador para consumir todo o biogás.....	61
Figura 24 - Indicação do n.º de horas/dia de funcionamento do motogerador. [25] .....	62
Figura 25 - Fluxos de energia térmica produzidos e necessidades térmicas da ETAR. ....	64
Figura 26 - Energia térmica desperdiçada. ....	66
Figura 27 - Potência elétrica tomada na ETAR durante um dia típico de Inverno.....	68
Figura 28 - Fluxos energéticos inerentes a um dia típico de Inverno.....	68
Figura 44 - Energia térmica desperdiçada na ETAR Sul.....	101

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição típica do biogás. [8] .....	14
Tabela 2-Índices de desempenho de uma unidade de cogeração por tipo de instalação. [20] .....	36
Tabela 3 – Rendimento global do motogerador da cogeração. [24].....	47
Tabela 4 - Quantificação dos fluxos energéticos.....	69
Tabela 5 - Quantificação dos fluxos energéticos.....	70
Tabela 6 - Rendimento elétrico do motogerador quando o combustível utilizado é o biogás. [22] .....	78
Tabela 7 - Quantificação dos fluxos energéticos.....	96
Tabela 8 - Quantificação dos fluxos energéticos para um dia típico de Verão. [25].....	98
Tabela 9 - Energia térmica desperdiçada no ano de 2013 na ETAR Sul.....	100
Tabela 10 - Quantificação das necessidades térmicas da ETAR Sul e da energia térmica desperdiçada que se encontra disponível para possível aproveitamento interno na ETAR. .....	102
Tabela 11 - Energia térmica restante na ETAR Sul no ano de 2013. ....	103
Tabela 12 - Biogás encaminhado para a tocha na ETAR Sul no ano 2013. ....	105
Tabela 13 - Energia térmica desperdiçada no ano de 2013. ....	107
Tabela 14 - Quantificação das necessidades térmicas da ETAR Norte e da energia térmica desperdiçada que se encontra disponível para possível aproveitamento interno na ETAR. .....	108
Tabela 15 - Energia térmica restante na ETAR Norte no ano de 2013. ....	110
Tabela 16 - Biogás encaminhado para a tocha na ETAR Norte no ano 2013. ....	111

## **Lista de Siglas**

<i>WWTP</i>	<i>Waste Water Treatment Plant</i>
AdP	Águas de Portugal
<i>CHP</i>	<i>Combined Heat and Power</i>
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
<i>PES</i>	<i>Primary Energy Savings</i>
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
SIMRIA	Saneamento Integrado dos Municípios da Ria de Aveiro
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia



## 1. Introdução

O contexto energético Mundial encontra-se fortemente condicionado pela anunciada escassez dos recursos energéticos não-renováveis, ditada pelo seu caráter finito e pelo constante aumento do consumo energético mundial. Este consumo crescente, motivado pelo progresso económico e social, tem induzido a procura de alternativas focalizadas nas energias renováveis que possam contribuir para assegurar o fornecimento de energia, sem agravar o consumo de combustíveis fósseis e a emissão de gases com efeito de estufa. Nesse sentido, a produção de energia elétrica a partir do gás metano (biogás) resultante da estabilização anaeróbia de efluentes tem vindo a ser estudada e praticada desde finais do século XIX, tendo assumido maior expressão a partir dos anos 70 do século XX, na sequência das primeiras crises petrolíferas. [1]

As ETAR reúnem fatores chave para o sucesso do aproveitamento energético do biogás produzido no tratamento de lamas. Por um lado produzem matéria-prima com potencial energético - lamas primárias e biológicas, na sequência do tratamento das águas residuais e, por outro, através da utilização de um motorizador é produzida energia elétrica e energia térmica para a manutenção de condições de estabilização anaeróbia das lamas. A valorização energética do biogás produzido a partir do processo de digestão anaeróbia das lamas por via de um sistema de cogeração, para além de permitir obter um retorno financeiro da produção de energia elétrica e aproveitamento da energia térmica para o processo, contribui para o equilíbrio dos custos de investimento e de exploração, bem como para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, como o dióxido de carbono e o metano. [2]

A cogeração, também frequentemente designada *CHP*, é definida como um processo de produção de energia elétrica e térmica de forma combinada, na medida em que ao projeto de cogeração está associado um consumidor que possa utilizar a energia térmica proveniente do sistema gerador de energia elétrica. Entende-se assim, por cogeração, a produção combinada de duas formas de energia – energia elétrica e energia térmica. [3]



## **1.1 Relevância do tema**

O presente trabalho apresenta um contributo para estudos futuros e melhorias a desenvolver pelas entidades gestoras de sistemas municipais e multimunicipais de tratamento de águas residuais, empresas e universidades. Baseia-se na compilação e quantificação de informação relativa à produção e utilização da energia e sugere medidas para o melhor aproveitamento dos diversos vetores energéticos produzidos nas ETAR Sul e Norte, situadas na zona industrial da Mota e em Cacia, no distrito de Aveiro. Contribui assim para cumprir vários objetivos desejáveis referentes às diversas formas de energia que podem ser produzidas numa ETAR: gestão eficaz dos resíduos, combate ao desperdício de energia e diminuição na emissão de gases de efeito de estufa.

De entre todas as formas de energia renovável, as que permitem valorizar resíduos são as mais nobres, pois aliam à produção de energia uma componente ambiental positiva direta. O biogás produzido nas ETAR, quando utilizado energeticamente, e em especial quando utilizado para a produção combinada de energia elétrica e energia térmica, pertence a este grupo.

O interesse deste combustível como recurso energético deve-se ao seu principal constituinte - o metano (composto que possui um elevado poder calorífico associado, que torna a sua queima para a produção combinada de energia elétrica e energia térmica – cogeração, muito oportuna).

## **1.2 Motivação**

É de todo o interesse proceder à análise dos fluxos energéticos gerados nas ETAR Sul e Norte, com o intuito de os quantificar, conhecer a forma como são geridos e daí estudar a viabilidade de implementação de melhorias e de outros cenários de valorização. Para isto é necessário analisar separadamente cada ETAR e cada fluxo energético.

Deste modo, e através da avaliação da capacidade de produção destes vetores, por ETAR, torna-se imperativo cooperar no sentido do seu uso mais racional, apelando desta forma a uma melhor gestão destes recursos.

### **1.3 Problema a resolver e qual a sua importância**

Portugal é um país com escassos recursos endógenos que nos asseguram as necessidades energéticas (como o petróleo, o carvão e o gás natural). Neste sentido, o estudo das diversas formas de energia produzidas nas ETAR e das suas necessidades energéticas, permite melhorar o seu desempenho global, e contribuir para ajudar a resolver as necessidades associadas a esta problemática.

### **1.4 Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é proceder à inventariação, quantificação e análise de todos os fluxos energéticos existentes na ETAR Sul e na ETAR Norte, tendo sempre em consideração as variações destes ao longo do ano. É também objetivo dar a conhecer a capacidade que as ETAR possuem em relação à produção das diversas formas de energia e quais os modos de valorização/aproveitamento energético inerentes.

No seguimento desta análise é ainda objetivo quantificar os desperdícios (se existentes) e propor medidas de melhoria relativas ao melhor aproveitamento de todas as formas de energia geradas.

### **1.5 Abordagem/metodologia de ataque/estudo exploratório**

Por forma a obter todos os dados relativos aos diversos vetores energéticos: consumo e produção de biogás, consumo e produção de energia elétrica, consumo e produção de energia térmica, necessidades térmicas e diagrama de fluxo da instalação de cogeração de cada uma das ETAR, foram realizadas diversas avaliações e compilações de dados. Isto é, numa primeira fase procedeu-se à monitorização em tempo real do consumo energético e da produção energética das duas ETAR para um dia típico de Verão e um dia típico de Inverno.

De seguida, procedeu-se à compilação e à avaliação dos fluxos energéticos e das necessidades energéticas de cada ETAR, para um ano e para um dia típico de Verão e um dia típico de Inverno.

Por forma a estudar as variações sofridas pelos vetores energéticos ao longo do dia e ao longo do ano, foram realizados diversos gráficos e tabelas. Foram ainda equacionados

três possíveis cenários de produção de energia elétrica, e consequente remuneração obtida pela venda dessa energia. Averiguou-se ainda o número de horas que os motogeradores teriam que trabalhar para que todo o biogás produzido fosse consumido, para cada uma das ETAR.

Importa referir que esta recolha, avaliação e análise de informação remete ao ano de 2013.

O tratamento dos dados foi feito com recurso ao *software Excel* e o diagrama de fluxo da instalação de cogeração com recurso ao *software AUTOCAD*.

## **1.6 Organização do trabalho**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo dedica-se à contextualização do trabalho, através de uma abordagem introdutória onde se identificou a relevância e o contexto dos problemas a resolver, e o respetivo enquadramento no panorama atual, definiram-se os objetivos e a metodologia/abordagem ao estudo. Seguem-se os restantes quatro capítulos:

- No Capítulo 2, começou-se por identificar e selecionar os conhecimentos teóricos relevantes para o tema do trabalho, onde se encontram reunidas informações sobre os processos de tratamento das águas residuais e, consequentemente, da produção do biogás. São também referidas as tecnologias de aproveitamento e valorização deste recurso energético através de diversas opções de cogeração, e o enquadramento legal do regime de venda de energia elétrica à rede nos regimes de cogeração e de miniprodução.
- No Capítulo 3, procedeu-se à descrição e análise dos casos em estudo – ETAR Sul e ETAR Norte.
- No Capítulo 4, são enunciadas algumas propostas de melhoria que visam o melhor aproveitamento dos fluxos energéticos gerados nas ETAR.
- Por último, no Capítulo 5, são expostas as considerações finais, validando os objetivos propostos para o trabalho. Fazem-se igualmente algumas apreciações gerais e propõem-se trabalhos futuros a realizar neste âmbito.

## **2 Estado da arte/enquadramento teórico**

### **2.1 Tratamento de águas residuais**

A gestão de recursos hídricos assume a maior relevância a nível nacional e Mundial.

A água de abastecimento, ao ser utilizada para consumo humano, transforma-se em água poluída, isto é, em água residual. Desta forma, uma água residual consiste num resíduo fluido que é rejeitado após o uso para fins domésticos, industriais, agrícolas e serviços públicos, podendo ou não ter o acréscimo de águas pluviais ou outras infiltrações. [4]

Quando não tratada, uma água residual tende a representar uma ameaça para a saúde pública e ambiental, e o seu tratamento surge como uma necessidade de desenvolvimento sustentável e de serviço público de carácter estrutural, essencial ao bem-estar geral, à saúde pública e à segurança coletiva das populações, às atividades económicas e à proteção do ambiente. Deste modo, cresce a necessidade de remover a matéria poluente das águas residuais de maneira a que estas possam ser descarregadas em cursos de água sem qualquer tipo de efeito ecológico adverso relevante. [4]

Uma ETAR tem um papel neste processo fundamental na medida em que recebe e trata os efluentes domésticos e industriais, através da separação e diminuição da quantidade de matéria poluente da água, permitindo a sua devolução ao meio ambiente nas melhores condições e de acordo com as exigências legais em vigor. A entidade reguladora desta atividade é a ERSAR. Em Portugal, segundo dados da AdP, no primeiro trimestre de 2013, existiam 228 municípios, abrangidos por ETAR. [5]

#### **2.1.1 Processos de tratamento de águas residuais**

As ETAR podem receber águas residuais com diferentes composições, o que implica a adoção de diferentes tipos de operações e processos de tratamento, adequados em função do tipo de águas residuais a tratar. [6]

De acordo com as definições dos respetivos diplomas legais, as águas residuais podem ser classificadas em três tipos: [8]

- **Águas residuais domésticas** – as águas residuais de serviços e de instalações residenciais, essencialmente provenientes do metabolismo humano e de atividades domésticas, (lavagens, cozinha, etc.);
- **Águas residuais industriais** – as águas residuais provenientes de qualquer tipo de atividade que não possam ser classificadas como águas residuais domésticas nem sejam águas pluviais;
- **Águas residuais urbanas** – as águas residuais domésticas ou a mistura destas com águas residuais industriais e/ou com águas pluviais.

Podem ainda ser consideradas as águas pluviais, como as águas constituídas exclusivamente pelas escorrências originadas pela precipitação.

A situação mais comum incide sobre o tratamento integrado de águas residuais domésticas e industriais, o que implica uma adaptação do sistema de tratamento às características das águas afluentes, sobretudo das águas residuais industriais, já que estas podem ter uma composição muito variada, de acordo com a tipologia de indústria. [6]

A caracterização das águas residuais a tratar é essencial para o adequado projeto e dimensionamento da ETAR e respetivo funcionamento.

O tratamento das águas residuais apresenta duas fases distintas: uma correspondente ao tratamento da fase líquida, cujo objetivo é o tratamento da água residual por forma a cumprir as condições exigidas na licença de descarga, para posterior rejeição no meio recetor; a outra corresponde ao tratamento da fase sólida, em que é dado tratamento adequado aos sólidos removidos da água residual na fase líquida. [6]

Na fase líquida, de um modo geral, existem quatro fases de tratamento das águas residuais numa ETAR, designadas por tratamento preliminar, primário, secundário e terciário.

O **tratamento preliminar** consiste num conjunto de operações físicas para remover materiais grosseiros da água residual, tais como por exemplo, areias e gorduras. O

objetivo desta etapa é proteger os elementos e processos de tratamento seguintes. Os elementos possíveis de aplicação nesta fase são, entre outros: [6]

- **Gradagem** – um sistema de grelhas, instalado num ou mais canais por onde circula a água residual, que retém os sólidos de maiores dimensões (ex. latas, papéis, paus, folhas/etc.). Estes sólidos grosseiros são temporariamente armazenados em contentores e posteriormente encaminhados para um destino final adequado.
- **Tamisação** – um tamizador consiste numa grade mecânica que retém os sólidos de menores dimensões, pelo que deve ser utilizado de forma complementar à gradagem.
- **Desarenação** – tem por objetivo a remoção das areias do efluente. Pode consistir, por exemplo, num tanque onde o efluente passa com uma velocidade reduzida, permitindo que as areias assentem por gravidade, sendo removidas e encaminhadas para um classificador de areias. As operações de desarenação e remoção de óleos e gorduras podem ser realizadas no mesmo elemento de tratamento (desarenadores/desengorduradores.)

O **tratamento primário** pode ser constituído por processos físicos e/ou químicos e tem por objetivo remover os sólidos facilmente sedentáveis. Esta etapa é efetuada genericamente através de sedimentação/decantação, ou flotação: [6]

- **Decantação** – tem como objetivo principal retirar os sólidos em suspensão decantáveis (por ação da gravidade). Esta operação é realizada num decantador onde a água permanece o tempo suficiente para permitir que as partículas suspensas sedimentem no fundo. A água clarificada passa para o tratamento secundário, enquanto as lamas primárias são recolhidas para posterior tratamento na fase sólida e as escumas são encaminhadas para o concentrador de gorduras do tratamento preliminar.

- **Flotação** – é uma operação destinada a remover sólidos de dimensões tão reduzidas que não é viável a sua separação por acção da gravidade. Consiste na injeção de um fluxo de ar ascendente no interior do tanque, sendo arrastados os sólidos, juntamente com as bolhas de ar, para a superfície, onde são recolhidos e encaminhados para tratamento na fase sólida.

O **tratamento secundário** é constituído geralmente por processos biológicos e tem como intuito retirar a matéria orgânica biodegradável existente no efluente que não foi retirada através do tratamento primário. Estes sistemas podem ser: [6]

- **Lamas ativadas** – O sistema de tratamento por lamas ativadas consiste num processo onde o efluente proveniente do tratamento primário é encaminhado para um tanque de arejamento (com a adição de ar ou oxigénio puro), onde é fornecido o oxigénio necessário para que os microrganismos metabolizem a matéria orgânica. De seguida, estes são removidos num decantador secundário, onde ocorre a separação da fase líquida (efluente tratado) e da fase sólida (lamas secundárias).

Num sistema de lamas ativadas convencionais há uma produção de lamas em excesso que são removidas e encaminhadas para a fase sólida. [6]

- **Lagoas** – No tratamento por lagunagem, a água residual atravessa um conjunto de lagoas onde ocorrem processos idênticos aos que ocorreriam em meio natural. O efluente é encaminhado graviticamente e em contínuo para lagoas com diferentes profundidades e dimensões, onde ocorrem processos de degradação através de microrganismos e microalgas.

O **tratamento terciário** complementa as etapas anteriores de tratamento, quer pela exigência de qualidade da água entrar para o meio recetor quer pelos usos previstos para o mesmo.

Assim, este tratamento poderá ter como objetivo a remoção de determinados poluentes que se mantêm na água após esta ter passado pelos tratamentos anteriores, como partículas

difícilmente decantáveis, microrganismos patogénicos, nutrientes (como azoto e fósforo), ou outros compostos, como herbicidas ou pesticidas. [6]

Na fase sólida, fazem parte do tratamento das lamas (primárias e secundárias) geradas na ETAR os seguintes processos: espessamento, digestão e desidratação.

- **Espessamento** - tem por objetivo reduzir o volume de lamas afluentes aos elementos subsequentes, diminuindo as dimensões desses elementos permitindo ainda a homogeneização das lamas e, assim, a otimização do funcionamento dos processos biológicos na digestão de lamas, e na desidratação. Os principais processos de espessamento existentes são o espessamento gravítico, o espessamento por flotação com ar difuso e o espessamento mecânico.

A água removida às lamas durante o processo de espessamento é encaminhada para o início do tratamento da fase líquida.

- **Digestão** – consiste num processo de mineralização biológica da matéria orgânica que pode ser feito na ausência de oxigénio (processo anaeróbio), ou com recurso a uma fonte externa de oxigénio, (processo aeróbio). [6]

É neste processo que se dá a formação do biogás que pode ser usado como combustível para a produção de energia elétrica e/ou térmica.

- **Desidratação** – A desidratação tem o objetivo de diminuir o volume total de lamas, através da redução do teor de humidade presente.



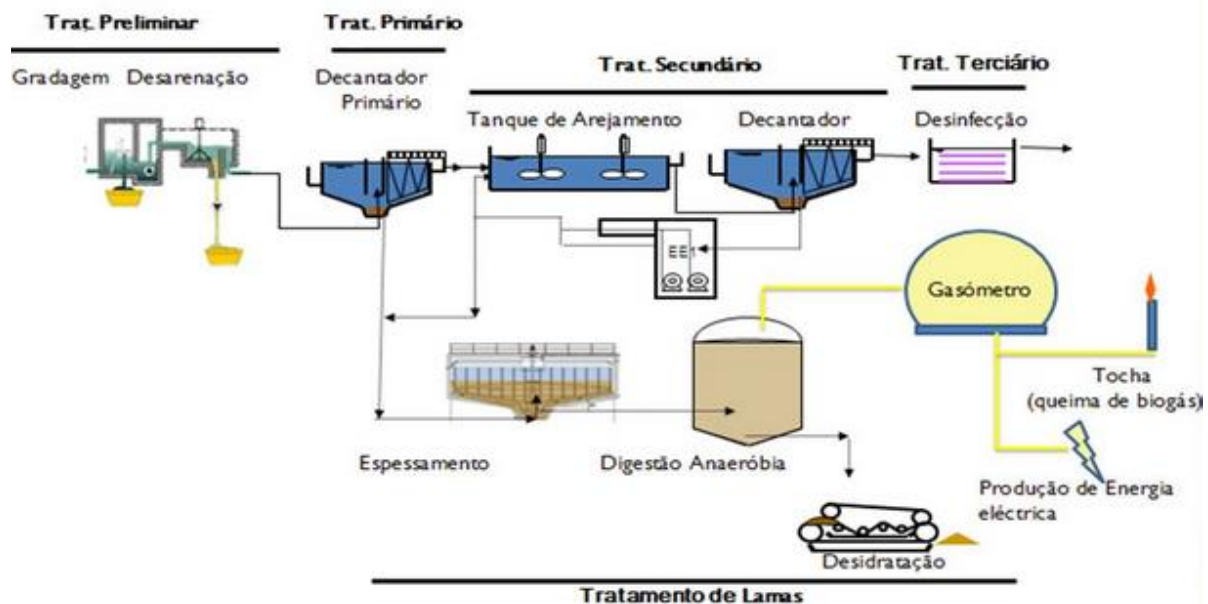


Figura 1 - Diagrama funcional típico de uma ETAR. [7]

## 2.2 O biogás - valorização energética dos resíduos orgânicos

A composição do biogás varia consoante as características do resíduo e as condições de funcionamento do processo de digestão. Em média, o biogás é constituído por 60 % de metano ( $\text{CH}_4$ ) e 30% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Outros gases, como o azoto ( $\text{N}_2$ ) e o sulfureto de hidrogénio (gás sulfídrico), ( $\text{H}_2\text{S}$ ), estão também presentes na mistura. O gás sulfídrico e os siloxanos, apesar de compostos residuais, têm efeitos nefastos sobre o equipamento de cogeração, pelo que devem ser previamente removidos através de um processo de dessulfurização. A composição típica do biogás encontra-se resumida na *Tabela 1*. [8]

Tabela 1 - Composição típica do biogás. [8]

Componente	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{NH}_3$	$\text{CO}$
Composição [%]	55-80	20-40	1-3	0,5-2,5	0,1-1	0,1-0,5	0,1-0,5	0-0,1
Volúmica								

Embora em termos absolutos o biogás seja menos energético do que a maioria dos gases normalmente utilizados como combustíveis, de que são exemplos os combustíveis

fósseis, pelo facto de ser um subproduto, e de ser renovável, torna a sua utilização bastante eficiente do ponto de vista ambiental.

Em suma, seja qual for a opção adotada para utilizar o biogás, haverá sempre lugar à produção de, pelo menos, uma forma de energia. Na *Fig. 2* estão indicadas as principais opções de valorização energética do biogás. [9]

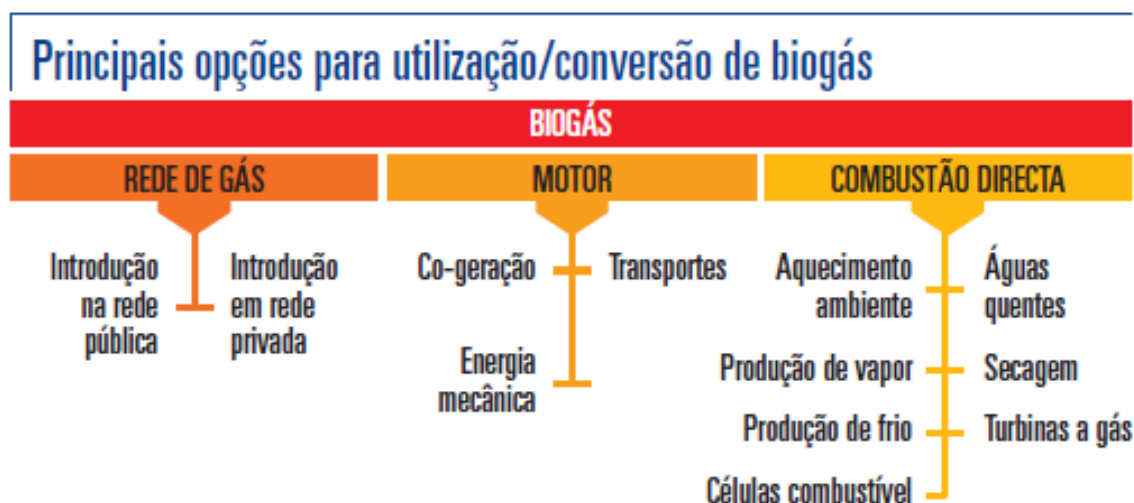


Figura 2 - Principais opções/conversão de biogás. [9]

### 2.2.1 Produção de biogás

O biogás pode ser produzido a partir de uma grande variedade de matéria orgânica, nomeadamente resíduos animais e vegetais, resíduos industriais e resíduos sólidos urbanos. [8]

No caso em apreço, este combustível provém da digestão das lamas originadas nos tratamentos primário e secundário dos efluentes líquidos. As lamas, constituídas essencialmente pela matéria orgânica do esgoto inicial, são o substrato ideal para a aplicação de um processo de tratamento designado por digestão anaeróbia. [8]

A matéria orgânica é assim colocada num digestor fechado, que possibilita a fermentação anaeróbia onde é, conservada a uma temperatura entre 30°C – 40°C. O processo nunca é totalmente anaeróbio, e como tal, entre 20 a 40%, em volume, do gás produzido é CO<sub>2</sub>. Apesar disso, é um combustível cuja utilização é interessante do ponto de vista energético e, além disso, os resíduos sólidos que resultam do processo constituem um bom fertilizante para a agricultura. [8]

Desta forma, a digestão anaeróbia é um processo biológico de degradação de matéria orgânica que ocorre na ausência de oxigênio, e tem por objetivo a estabilização da porção biodegradável das lamas primárias e secundárias resultantes do processo de tratamento de águas residuais. Durante o processo de degradação de sólidos voláteis e outros compostos orgânicos por bactérias obtêm-se compostos, essencialmente o metano e o dióxido de carbono, que vão dar origem ao biogás. Este processo oferece a possibilidade de valorizar economicamente o gás produzido já que o mesmo é combustível. [10]

A digestão anaeróbia é caracterizada por uma sucessão de reações complexas e interdependentes que, de forma muito sintética, pode ser descrita por 4 fases principais: hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese.

- **Hidrólise** - Solubilização de hidratos de carbono, proteínas e lípidos em açúcares e aminoácidos.
- **Acidogénese** - Conversão dos açúcares e dos aminoácidos em ácidos gordos voláteis.
- **Acetogénese** - Os ácidos gordos voláteis são oxidados e dão origem a acetatos  $H_2$  e  $CO_2$ .
- **Metanogénese** - O metano é obtido por duas vias principais: reação do  $H_2$  com o  $CO_2$  provenientes de reações anteriores, originando o  $CH_4$ , e a conversão dos acetatos em  $CH_4$  e  $CO_2$ . [11]

## 2.3 Enquadramento legal

### 2.3.1 Enquadramento legal miniprodução

No desenvolvimento da Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020), que foi aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º29/2010, de 15 de Abril, a Resolução do Conselho de Ministros n.º54/2010, de 4 de Agosto, veio determinar a elaboração do regime jurídico do acesso à atividade de miniprodução, e estabeleceu as linhas gerais de orientação para o novo regime de funcionamento aplicável à produção de

eletricidade por intermédio de instalações de pequena potência, designadas por unidades de miniprodução. Os regimes jurídicos de produção de eletricidade através deste tipo de unidades constam do Decreto-Lei n.º 118-A/2010, de 25 de Outubro, e do Decreto – Lei n.º34/2011, de 8 de Março. Estes diplomas estabelecem os regimes remuneratórios aplicáveis às referidas formas de produção de eletricidade, bem como as correspondentes regras de relacionamento comercial.

Porém, o regime de produção de eletricidade com autoconsumo não teve a aceitação esperada, sendo muito poucas as unidades regidas pelo Decreto-Lei n.º68/2002, de 25 de Março, pelo que este foi entretanto revogado.

É, portanto intenção do Governo iniciar um processo de revisão ao regime jurídico da miniprodução, bem como a concretização e desenvolvimento das soluções gizadas nos Decretos-Leis n.º215-A/2012 e 215-B/2012, de 8 de Outubro, que complementaram a transposição da Diretiva n.º2009/72/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de Julho, que estabelece regras comuns para o mercado interno da eletricidade.

Até à conclusão do referido processo de revisão, o Decreto-Lei n.º25/2013, de 19 de Fevereiro, estabelece o novo regime jurídico aplicável à produção de eletricidade e procede à revogação do Decreto-Lei n.º34/2011, de 8 de Março (complementado pelas Portarias n.º178/2011, de 29 de Abril e, n.º285/2011, de 28 de Outubro) que revogou o Decreto-Lei n.º68/2002, de 25 de Março, referente ao regime de pequena produção de eletricidade para autoconsumo.

Nos termos do novo regime, entende-se por “unidade de miniprodução”, a instalação de produção de eletricidade, a partir de energias renováveis, baseada numa só tecnologia de produção cuja potência de ligação à rede seja igual ou inferior a 250 kW. O regime remuneratório (regime geral e regime bonificado), e o regime de gestão de capacidade de receção nas redes encontram-se discriminados nos Artigos 2º e 3º do Decreto – Lei n.º25/2013, de 19 de Fevereiro, respetivamente.

Os escalões de potência de ligação à rede em que se inserem as unidades de miniprodução encontram-se discriminados no Artigo 2º, onde são adotadas as seguintes classificações:

- **Escalão I** – unidades cuja potência não seja superior a 20 kW.

- **Escalão II** – unidades cuja potência de ligação seja superior a 20 kW e inferior a 100 kW.
- **Escalão III** – unidades cuja potência de ligação seja superior a 100 kW, ou igual ou inferior a 250 kW.

### **2.3.2 Enquadramento legal da cogeração**

As crescentes preocupações com a defesa do meio ambiente e com a eficiência energética global tornam necessário um maior estreitamento das políticas ambientais e energéticas, por forma a viabilizar o cumprimento dos compromissos internacionais nos dois âmbitos.

A entrada em vigor da Diretiva n.º 2004/8/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de Fevereiro, relativa à promoção da cogeração com base na procura de calor útil no mercado interno da energia, e que altera a Diretiva n.º92/42/CE, de 21 de Maio, torna necessária a adaptação do regime da atividade da cogeração.

Desta forma, em Portugal a transposição para a ordem jurídica interna da Diretiva n.º2004/8/CE foi aprovada pela tutela para produzir alterações profundas no enquadramento legal da atividade da cogeração que estabelece o regime jurídico e remuneratório aplicável à energia elétrica e mecânica e de calor útil produzido em cogeração, através do Decreto-Lei n.º 23/2010 de 25 de Maio, posteriormente alterado pela Lei n.º 19/2010 de 23 de Agosto, e complementado pela Portaria n.º140/2012 de 14 de Maio, com Declaração de Retificação n.º35/2012, e posteriormente alterado pela Portaria 325-A/2012, de 16 de Outubro, que visa assegurar de uma forma adequada e eficiente a aplicação dos termos referidos na Portaria n.º140/2012.

O desenvolvimento do mercado interno da energia levou à aprovação da Diretiva n.º2003/34/CE, de 26 de Junho que aprofunda as reformas liberalizadoras na operação do mercado do sector e conduziu à reforma do seu enquadramento legal principalmente traduzido pelo Decreto-Lei n.º29/2006, de 15 de Fevereiro, que define as bases gerais da organização e estabelece os princípios gerais relativos à organização e funcionamento do sistema elétrico nacional, bem como ao exercício das atividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de eletricidade e à organização dos mercados de eletricidade, transpondo para a ordem jurídica interna os princípios da Diretiva n.º 2003/54/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 26 de Junho, que estabelece regras

comuns para o mercado interno da eletricidade, e revoga a Diretiva n.º 96/92/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Dezembro, e do Decreto-Lei n.º172/2006 de 23 de Agosto, que desenvolve estas bases.

### **2.3.3 Enquadramento legal - ETAR a estudar**

As instalações utilizadas para a produção simultânea de energia elétrica e energia térmica, das ETAR Norte e Sul detidas pela SIMRIA, e mais adiante discriminadas como casos de estudo, encontram-se licenciadas desde o dia 2 de Maio de 2013, ao abrigo do novo regime de miniprodução estabelecido pelo Decreto-Lei n.º25/2013, de 19 de Fevereiro.

Até então, encontravam-se vinculadas ao regime de pequena produção para autoconsumo previsto no Decreto-Lei n.º 68/2002, de 25 de Março, que entretanto foi revogado.

De acordo com a legislação em vigor, as ETAR encontram-se abrangidas pelo escalão III, com potência máxima de ligação á rede de 250 kW e, uma vez que se encontram inseridas neste escalão e utilizam como energia primária o biogás produzido na digestão anaeróbia das lamas processadas, foi-lhes atribuído o regime remuneratório bonificado, que contempla a tarifa de referência aplicada, fixada em € 250/ MWh com uma redução de 7% ao ano.

A SIMRIA optou pelo regime jurídico da miniprodução, uma vez que os pedidos de ligação à rede elétrica nacional para uma potência de produção superior a 250 kW foram sempre indeferidos pela DGEG.

## **2.4 Cogeração**

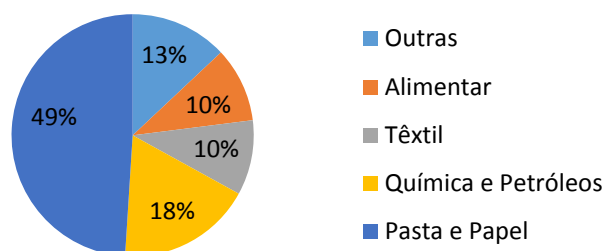
Os sistemas de produção combinada de calor e de eletricidade, baseados em caldeiras e máquinas de vapor, começaram a ser instalados a partir dos anos 30 do século passado, em unidades industriais (açúcar, refinação de petróleo, papel e têxtil). [12]

Só em 1982, com o objetivo de incentivar a auto produção de energia elétrica, foi regulada a qualidade de produtor independente, com a possibilidade de estabelecer o paralelo com a Rede Elétrica Nacional. [12]

As principais unidades fabris dos diferentes sectores industriais, com consumos significativos de energia térmica e em que os projetos demonstravam viabilidade técnica e

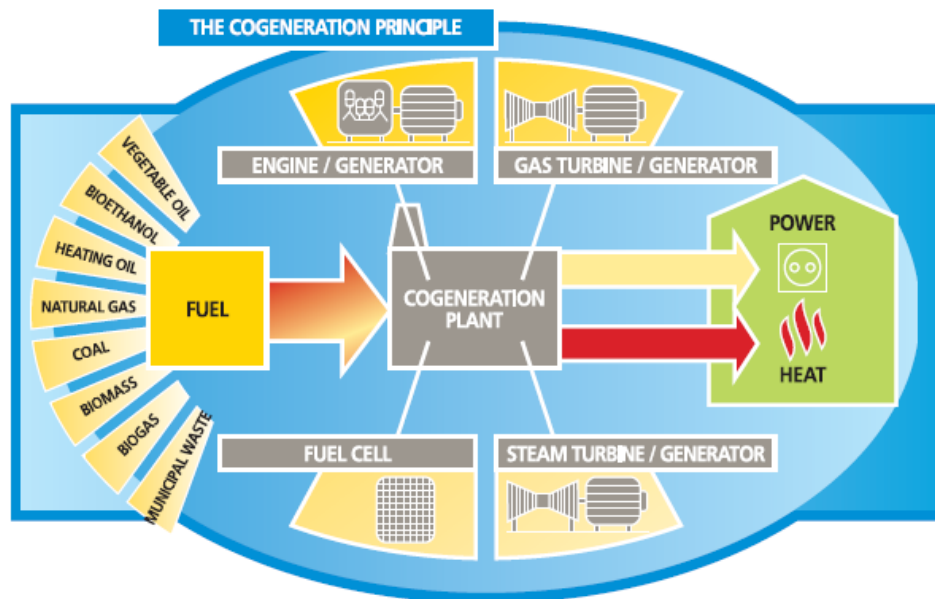
económica, foram-se equipando, até 1990, com sistemas de cogeração, desde a celulose à química, passando pelo têxtil, papel, açúcar, cerveja até aos derivados de madeira.

Os incentivos financeiros para a utilização racional de energia foram instrumentos essenciais para a promoção da tecnologia e implementação destes últimos projetos, na generalidade de pequena/média potência. Estes desenvolvimentos permitiram que Portugal atingisse uma potência instalada de 530 MW, distribuídos pelos sectores industriais mais variados: têxtil, pasta e papel, química, alimentar, entre outros, visíveis na *Fig. 3*. [12]



**Figura 3 - Distribuição das centrais de cogeração por setores em 1990. [12]**

A cogeração, também designada por *CHP*, surge como a melhor solução técnica disponível para produzir energia elétrica e energia térmica com melhor eficiência possível mediante a queima de um combustível, seja este de origem não-renovável ou renovável [13]. A melhoria da eficiência global deste tipo de tecnologia resulta do facto de ao projeto de cogeração estar associado um consumidor que possa utilizar a energia térmica proveniente da combustão que não é transformada em eletricidade. [13] Desta forma, entende-se por cogeração a produção combinada de duas formas de energia – energia elétrica e energia térmica útil – utilizada num processo tecnológico como ilustrado na *Fig. 4*. Analisando a figura é perceptível que a partir da combustão dos mais variados combustíveis, como por exemplo: biomassa, biogás e gás natural e, a partir de vários componentes de produção de energia, como motor de combustão interna, turbina a gás, células combustível e turbina a vapor é possível a produção combinada dos dois tipos de energia. [12]



**Figura 4 - Representação esquemática do conceito de cogeração. [12]**

A cogeração pode ainda ser dividida em dois tipos: topo e fundo, (*“topping and bottoming cycles”*) – ciclos simples, e ainda ciclo combinado. Estas subdivisões têm como intuito indicar o sistema primário para o qual se aplica. Desta forma, no ciclo de topo (mais comum) o calor rejeitado pela unidade de produção de energia elétrica é aproveitada para alimentar um processo (ciclo existente nas ETAR que vão ser alvo de análise). Em contraste, no ciclo de fundo o calor rejeitado no processo industrial é utilizado para a produção de energia elétrica (ex.º: indústria do vidro, aço, etc). [14]

O processo de produção de energia em ciclo combinado visa a combinação de dois ciclos termodinâmicos num processo de produção de energia elétrica com o intuito de aumentar a eficiência deste processo.

A energia elétrica produzida pode ainda ser utilizada no local, distribuída através da rede pública, ou ambas.

A energia térmica é normalmente usada no local para aquecer o ar, espaço, água ou utilizada num processo. O interesse neste tipo de tecnologia tem vindo a aumentar, podendo ser empregue em instalações industriais, edifícios comerciais, hotéis, hospitais, escolas e aplicações rurais. [13]



A cogeração desempenha um papel importante na medida em que acelera o processo de integração de tecnologias de energia renovável, sendo também energeticamente eficiente (balanço energético), proporcionando um aproveitamento de mais de 70% de energia térmica proveniente dos combustíveis utilizados no processamento.

Distingue-se da produção convencional de energia elétrica utilizando combustíveis fósseis, dado que nesta se desperdiça uma parte muito significativa do calor resultante da combustão, normalmente mais de 60%. Desta forma, a cogeração assegura e responde às políticas energéticas comunitárias e nacionais, dado que é uma tecnologia que permite racionalizar o consumo dos combustíveis necessários à produção de energia útil, como demonstra a *Fig. 5*. [12]

A nível ambiental, as emissões são significativamente mais reduzidas, uma vez que para fornecer a mesma energia final é utilizada menos energia primária, assumindo um papel importante para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. [15]



**Figura 5 -Representação esquemática de uma instalação de cogeração. [12]**

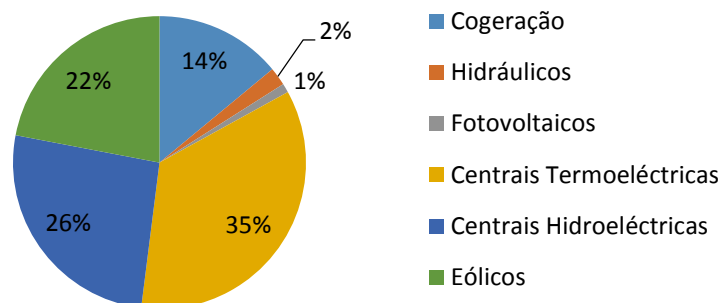
Este sistema de energia permite ainda, a otimização do uso de recursos de energia, com a exploração máxima dos seus produtos energéticos.

A principal vantagem técnica dos sistemas de cogeração é a sua capacidade para melhorar a eficiência global, ou seja, para a produção combinada de energia elétrica e térmica, contudo, a totalidade de combustível necessário para produzir ambas as formas de energia num sistema de cogeração é menor do que o combustível necessário para produzir a mesma quantidade de energia elétrica e energia térmica em sistemas separados. [13]

São ainda vantagens a nível económico, como a nível técnico e ambiental, a produção de energia onde é requerida (eliminando-se as perdas no transporte e na distribuição), emissões de gases de efeito de estufa mais reduzidas, redução da dependência de combustíveis importados, promoção da estabilidade da rede elétrica e promoção da utilização de recursos energéticos locais. [13]

Em Portugal, a opção pela cogeração é especialmente utilizada para indústrias ou instalações de serviços que consomem grandes quantidades de energia térmica, sendo a indústria petroquímica e química, a indústria da pasta de papel, a indústria de cerâmica, a indústria têxtil e a indústria alimentar as mais apropriadas para a implementação de cogeração. [12]

Segundo a COGEN Portugal (Associação Portuguesa para a Eficiência Energética e Promoção da Cogeração), as instalações de cogeração existentes utilizam maioritariamente como combustível o gás natural, sendo que a potência total instalada, a partir destas centrais, atingiu, no início de 2012, cerca de 1.300 MW, repartidos por diversas tecnologias conforme apresentado na Fig. 6. [3]



**Figura 6 – Produção de energia elétrica em Portugal em 2012. [4]**

### **2.4.1 Tecnologias de cogeração**

Uma instalação de cogeração inclui vários componentes, os quais são condicionados pelo tipo de combustível utilizado como recurso de energia primária. Desta forma, podem-se identificar: [14]

- Equipamento de conversão de energia primária:

- Turbina a gás (ciclo de *Brayton*): geralmente potências mínimas de 100 kW.
- Turbina a vapor (Ciclo de *Rankine*): máquina de combustão externa, admite grande variedade de combustíveis na caldeira.
- Motor alternativo de Combustão Interna (Ciclo *Diesel* ou *Otto*);
  - Equipamento de conversão de energia térmica em trabalho mecânico e elétrico (Motores *Stirling*, Ciclos Orgânicos de Rankine, etc.);
  - Recuperador de Calor;
  - Chillers de absorção – para produção de frio (trigeração).

Cada um dos equipamentos supramencionados é condicionado pelo combustível a utilizar. Por exemplo, para gerar trabalho mecânico (e consequentemente eletricidade) numa turbina a gás ou num motor alternativo de combustão interna, o fluido de trabalho são os gases de combustão, mas no caso de uma turbina a vapor o fluido de trabalho é o vapor de água. A componente de energia térmica pode ter origem nos gases de combustão ou no vapor de água, consoante se trata de uma turbina a gás ou de um motor alternativo de combustão interna ou duma turbina a vapor, respetivamente. [14]

## 2.4.2 Tipos de tecnologias de cogeração

A análise de uma central de cogeração, mais concretamente o estudo do equipamento de conversão de energia, implica o conhecimento do tipo de combustível utilizado e, consequentemente do respetivo processo de combustão. [16] Entende-se por combustão o processo de conversão de diferentes combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos em energia térmica. No caso concreto deste trabalho recorreu-se ao estudo de quatro tipos distintos de recursos energéticos, sendo dois deles não-renováveis, o gás natural e o *diesel*, e outros dois renováveis: a biomassa sólida e o biogás. [14]

Assim sendo, para analisar a geração de potência associada ao processo térmico, procedeu-se ao estudo da turbina a vapor que opera segundo o ciclo de *Rankine*, ao estudo da turbina a gás que opera segundo o ciclo de *Brayton* e ao estudo dos motores alternativos de combustão interna: ciclo Diesel e ciclo Otto. [14]

As centrais de cogeração são ainda classificadas quanto ao tipo de ciclo em que operam:

- **Ciclo Simples** – Esquema que utiliza um único tipo de equipamento gerador, sendo o calor libertado pelo motor térmico utilizado apenas para recuperação térmica e não para produção de energia mecânica ou elétrica;
- **Ciclo Combinado** – Esquema que utiliza motor(es) alternativo(s) ou turbina(s) a gás conjugados com uma (ou mais) turbina(s) a vapor onde se utiliza o vapor gerado pelo aproveitamento térmico dos gases de escape da(s) turbina(s) a gás ou motor(es) para produção de energia mecânica ou elétrica. [3] Neste âmbito é comum o ciclo combinado gás + vapor.

### 2.4.2.1. Turbina a vapor

Como visto anteriormente, a turbina a vapor é um componente de uma instalação de cogeração, sendo esta adequada quando queremos obter cargas térmicas elevadas relativamente à carga elétrica. Esta é utilizada para converter parte do calor libertado na combustão de biomassa em energia mecânica. No ciclo de *Rankine*, o fluido de trabalho é o vapor de água, que tem como características desejáveis: baixo custo, boa disponibilidade e alta entalpia de vaporização. O ciclo encontra-se representado na *Fig. 7*, e é o ciclo ideal das turbinas a vapor, (não envolve nenhuma irreversibilidade interna), e consiste nos seguintes processos: [17]

- 1-2 – Compressão isentrópica na bomba;
- 2-3 – Fornecimento de calor na caldeira, a pressão constante (alta);
- 3-4 – Expansão isentrópica na turbina;
- 4-1 – Rejeição de calor a pressão constante (baixa) no condensador.

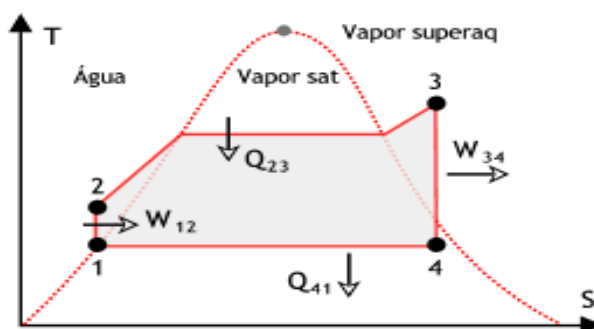
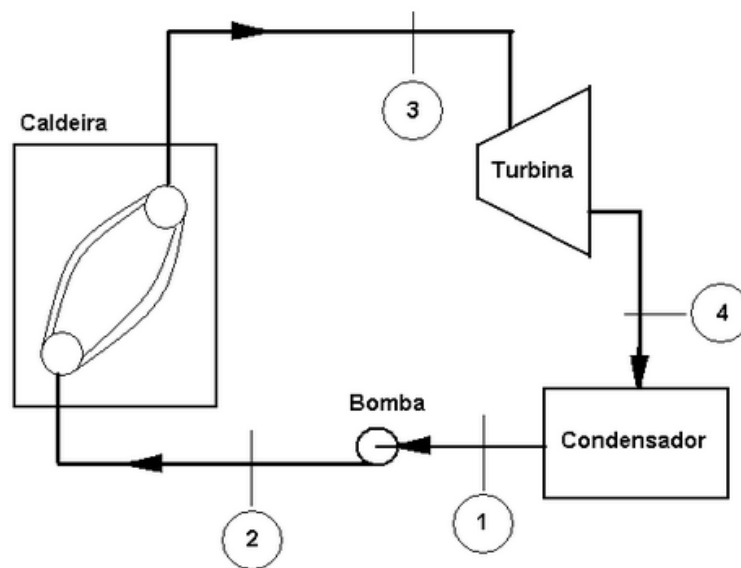


Figura 7 - Representação esquemática em diagrama T- s do ciclo de *Rankine*. [17]



**Figura 8- Representação esquemática dos elementos do ciclo de *Rankine*. [17]**

Analisando, a água entra na bomba no estado 1 como líquido saturado e é comprimida de maneira isentrópica até à pressão de operação da caldeira. A temperatura da água aumenta durante este processo de 1-2, devido a uma ligeira diminuição do volume específico da água. A água entra na caldeira como líquido comprimido no estado 2 e sai como vapor sobreaquecido no estado 3. A caldeira é basicamente um grande permutador de calor, na qual o calor originário dos gases de combustão provenientes da queima de biomassa ou de carvão é transferido para a água a pressão constante levando à obtenção de vapor e ao seu eventual sobreaquecimento.

O vapor de água sobreaquecido no estado 3 entra na turbina na qual se expande de forma isentrópica produzindo trabalho que faz girar o eixo da turbina acoplado a um gerador elétrico. A pressão e a temperatura do vapor baixam durante este processo para os valores do estado 4, no qual o vapor entra no condensador. Nesse estado, o vapor é uma mistura bifásica de líquido e vapor saturados, ou seja, com título diferente de 1. [17]

O vapor é condensado a pressão constante (baixa) no condensador, e o calor resultante deste processo rejeitado para o exterior. É neste ponto que surge a cogeração: dado que numa central de cogeração que opera com ciclo de *Rankine* não existe condensador, assim, nenhum calor é rejeitado, ou seja, o calor rejeitado é utilizado como calor para alimentar um processo ou para a produção de energia elétrica como é mostrado na *Fig. 9*. [17]

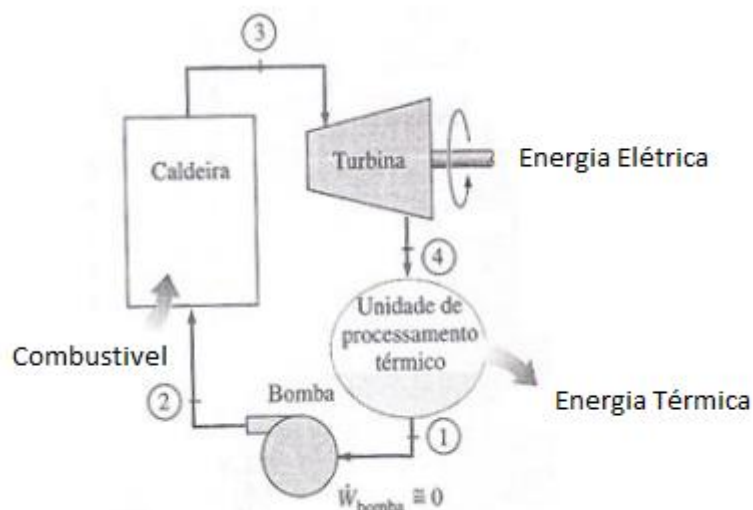


Figura 9 - Instalação de cogeração ideal com turbina de vapor. [17]

#### 2.4.2.2 Turbina a gás

A turbina a gás utiliza como combustível de queima o gás natural e o biogás e como fluido de trabalho os gases provenientes da combustão desse gás. O ciclo utilizado neste tipo de turbinas é o ciclo de *Brayton* ideal, formado por quatro processos internamente reversíveis, como ilustrado na *Fig. 10*. [17]

- 1-2 Compressão isentrópica no compressor;
- 2-3 Fornecimento de calor a pressão constante (alta);
- 3-4 Expansão isentrópica na turbina;
- 4-1 Rejeição de calor a pressão constante (baixa).

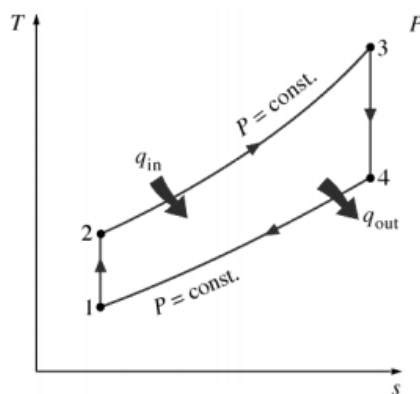
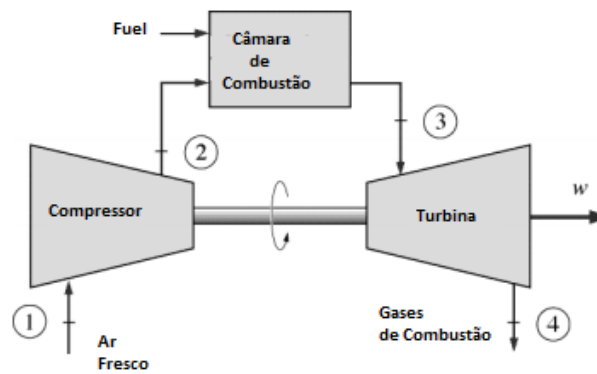


Figura 10 - Representação esquemática em diagrama T- s do ciclo de *Brayton*. [17]



**Figura 11 - Representação esquemática dos elementos do ciclo de *Brayton*. [17]**

Neste ciclo o ar proveniente do exterior (atmosfera) é admitido no compressor, em cuja saída a temperatura e pressão são elevadas, estado 2. A alta pressão, o ar entra na câmara de combustão na qual o combustível é queimado a pressão constante. De seguida, os gases resultantes da combustão a alta temperatura entram na turbina no estado 3, onde se expandem até à pressão atmosférica, produzindo trabalho mecânico e rejeitando calor para o exterior.

Contudo, tal como visto no ciclo acima mencionado, numa central de cogeração, em vez de haver rejeição desse calor este vai ser utilizado para alimentar um processo, (*Fig. 12*). [17]

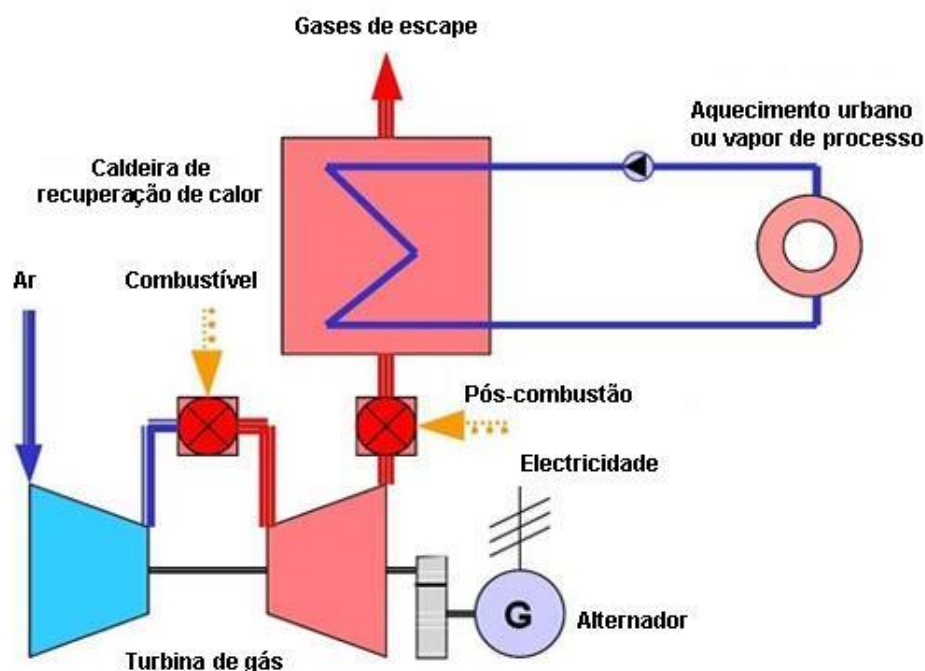


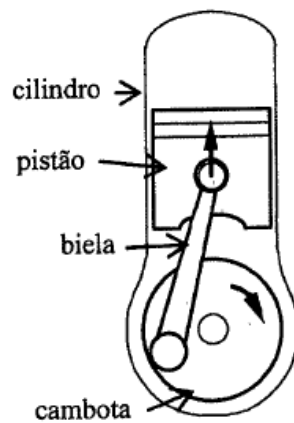
Figura 12 - Instalação de cogeração que opera com turbina a gás em ciclo simples. [3]

### 2.4.2.3 Motor Alternativo de combustão interna

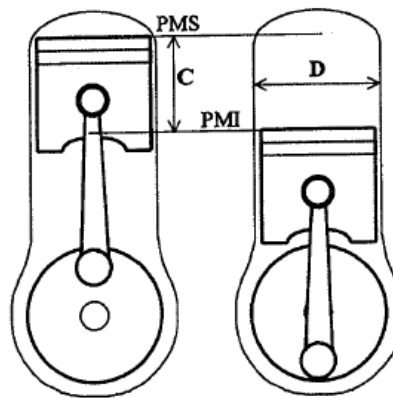
O motor alternativo de combustão interna aproveita o aumento de pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível para imprimir um movimento de rotação ao veio motor. O motor é constituído por cilindros, dentro dos quais deslizam pistões ligados a um veio (veio motor denominado cambota) pelas bielas (*Fig. 13*). Se fizermos rodar a cambota, os pistões sobem e descem nos diversos cilindros. Inversamente, o pistão submetido a elevadas pressões faz rodar a cambota. Para que o motor não pare quando um pistão estiver a comprimir ar num cilindro, ou para que não tenha um andamento muito irregular, uma extremidade da cambota é munida de um volante de inércia, que acumula energia cinética de rotação. [18]

O ponto mais alto que o pistão pode atingir dentro do cilindro denomina-se ponto morto superior, ou PMS (*Fig. 13*). Ao ponto mais baixo chama-se ponto morto inferior, ou PMI. A distância percorrida pelo pistão entre os dois pontos mortos extremos designa-se por curso. [18]





**Figura 13 - Sistema biela-manivela. [18]**



**Figura 14 - Pontos mortos superior e inferior do motor. [18]**

Relativamente às características de um motor, cita-se o diâmetro ( $D$  - *Fig. 14*) interior de cada cilindro, seguido do curso.

Num motor de explosão o curso pode ser maior ou menor do que o diâmetro. Mantendo o volume do cilindro, pode-se aumentar ao diâmetro e diminuir ao curso, ou vice-versa. Diminuindo-se o curso, reduz-se a velocidade linear do pistão, se o motor rodar á mesma velocidade de rotação, ou conseguem-se maiores velocidades de rotação para a mesma velocidade linear do pistão. Assim, a relação curso-diâmetro é muito importante para as características de um motor. [18]

A cilindrada é outra caraterística importante na medida em que representa o volume varrido quando o pistão desce desde o PMS até ao PMI, ou seja, é o volume correspondente a um cilindro cuja base é a secção do mesmo e a altura é o curso do pistão;

à soma dos volumes varridos de todos os cilindros de um motor dá-se então o nome de cilindrada do motor. [18]

A taxa de compressão do motor corresponde à divisão do volume total deixando livre no cilindro quando o pistão se encontra no PMI pelo valor quando está no PMS, obtendo-se através da Equação 1: [18]

$$\varepsilon = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_{Varrido} + V_{cc}}{V_{cc}}, [-] \text{ Eq.1}$$

Onde:

- $\varepsilon$  – Taxa de compressão, [-],
- $V_{cc}$  – Volume da câmara de combustão, [m<sup>3</sup>],
- $V_{Varrido}$  – Volume varrido pelo pistão entre o PMS até ao PMI, [m<sup>3</sup>].

#### 2.4.2.4 Ciclo Otto

O motor de combustão mais vulgar é o motor de ignição comandada ou de ignição por faísca, uma vez que a sua combustão se inicia devido a uma descarga elétrica de elevada tensão (faísca) dentro da câmara de combustão. [18]

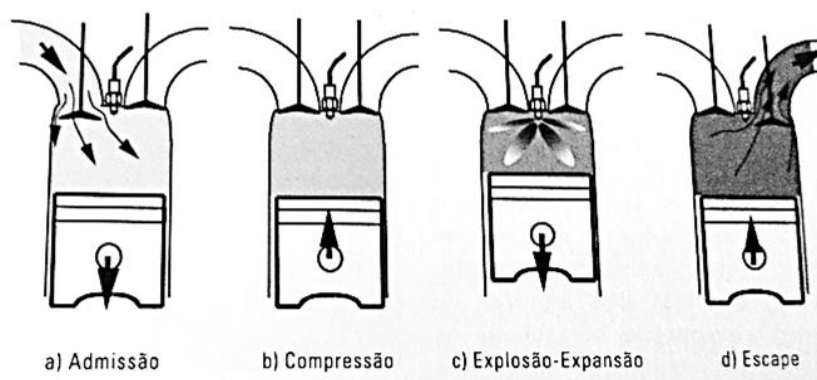
Na *Fig. 15* estão representados os estágios diferentes do ciclo, realizado por um motor de 4 tempos o qual é composto por quatro etapas: admissão, compressão, explosão-expansão e escape.

Na primeira fase, admissão, o pistão encontra-se a efetuar um curso descendente, estando a válvula de admissão aberta. No seu movimento descendente, o pistão provoca uma depressão no interior do cilindro, o que conduz a mistura vinda do sistema de alimentação para dentro do cilindro, com o pistão a movimentar-se do PMS ao PMI. [18] Seguidamente dá-se a compressão, com ambas as válvulas fechadas, admissão e escape, o pistão sobe do PMI ao PMS, comprimindo a mistura que foi admitida durante a admissão. Esta compressão vai elevar a temperatura e a turbulência da mistura, vaporizando alguns dos seus componentes ainda no estado líquido e homogeneizando a mistura. [18]

A combustão é desencadeada por uma faísca, e será, nestas condições, mais completa, libertando mais calor e uma menor quantidade de produtos não queimados, altamente poluentes. No entanto, a temperatura no final da compressão deverá ficar bastante abaixo da temperatura de autoignição da mistura. [18]

Na fase de expansão, no momento em que o pistão chega ao fim do curso de compressão (PMS), produz-se uma faísca elétrica entre os elétrodos da vela, na câmara de combustão. A mistura, já aquecida e comprimida, queima rapidamente (explosão). A pressão obtida é muito elevada, o que ocasiona a que o pistão seja empurrado violentamente até ao PMI. [18]

É esta descida do pistão que impulsiona o veio motor que se encontra ligado a um alternador e, por sua vez a um gerador, onde se produz energia elétrica. Esta é a única altura em que o motor fornece trabalho, chamando-se por isso tempo motor. Por último, a fase de escape caracteriza-se pela abertura da válvula de escape no final do tempo motor (PMI) e os gases queimados escoam-se por esta a grande velocidade. O pistão, no seu movimento ascendente, vai limpar o interior do cilindro dos gases queimados, sendo a válvula de escape fechada com a chegada do pistão ao topo do cilindro (PMS). Depois de evoluírem no sistema de escape, os gases queimados são aproveitados para o processo através da libertação de alguma da sua energia térmica. [18]



**Figura 15 - Os 4 tempos do motor de ignição comandada. [18]**

#### **2.4.2.5 Ciclo Diesel**

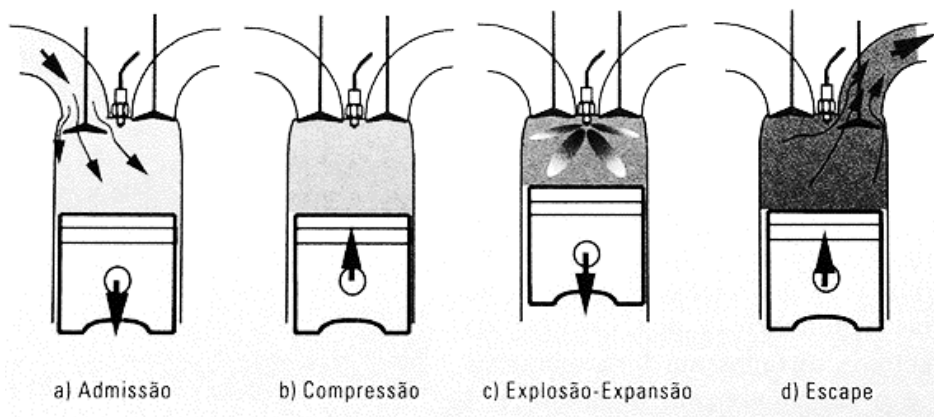
O motor Diesel ou motor de ignição por compressão, não possui sistema de preparação da mistura exterior nem sistema de ignição. Aspira ar puro que, submetido à elevada pressão atingida no final da compressão, atinge uma temperatura suficiente para garantir a inflamação do combustível, gasóleo, à medida que este é injetado no seio do ar comprimido. [18]

Como o ar se encontra a elevada pressão, é necessário que o combustível seja introduzido a uma pressão ainda superior, para o qual é indispensável o uso de um sistema de injeção a alta pressão. Este sistema comprime e fornece o gasóleo a cada cilindro, na altura e com a qualidade exata a fim de permitir uma combustão suave.

Desta forma, as quatro fases ciclo do motor Diesel de 4 tempo são: admissão, compressão, combustão-expansão e escape, como ilustra a Fig. 16. [18]

Na fase de admissão, o pistão parte do PMS, descendo até ao PMI. A válvula de admissão encontra-se aberta durante este período, admitindo ar puro para dentro do cilindro, enchendo-o. Na fase de compressão, com ambas as válvulas fechadas, o pistão sobe até ao PMS, comprimindo o ar puro encerrado no cilindro. Na fase de combustão-expansão, começando no PMS ou ligeiramente antes, o combustível é injetado no seio do ar quente, inflamando-se espontaneamente ao contactar com este. [18]

A injeção (e a combustão) continua durante parte da descida do pistão, sendo este o tempo motor onde se realiza trabalho com produção de energia elétrica. Por último, na fase de escape, quando o pistão chega ao PMI a válvula de escape abre-se permitindo que os gases queimados sejam libertados, através do sistema de escape, durante a subida do pistão, e aproveitados para processo através da libertação de alguma da sua energia térmica. [18]



**Figura 16 - Os 4 tempos do motor de ignição por compressão. [18]**

## 2.5 Indicadores de eficiência de uma central de cogeração

### 2.5.1 Eficiência energética

A eficiência de uma central de cogeração pode ser calculada como a razão entre a produção total de potência térmica e elétrica, pelo poder calorífico inferior do combustível e energia primária consumida, como expresso pela Eq. 2: [13]

$$\eta_{CHP} = \frac{(\dot{E}_{CHP} + \dot{Q})}{\dot{m}_{fuel\_CHP} \times LHV_{fuel}}, \text{ Eq.2}$$

onde:

- $\eta_{CHP}$  – Eficiência energética de uma instalação de cogeração, [%]
- $\dot{E}_{CHP}$  – Potência elétrica produzida pelo sistema [W],
- $\dot{Q}$  – Potência térmica utilizada no processo, [W],
- $\dot{m}_{fuel\_CHP}$  – Caudal mássico de combustível, [kg/s],
- $LHV_{fuel}$  – Poder calorífico inferior do combustível, [J/kg].

### 2.5.2 Eficiência térmica e eficiência elétrica

No contexto da cogeração, produção combinada de energia elétrica e térmica, a energia primária que é convertida em energia elétrica e térmica pode ser quantificada através da eficiência elétrica e eficiência térmica respetivamente, como expresso na Eq.3 e Eq.4: [15]

$$\eta_Q = \frac{Q}{H}, \text{ Eq.3}$$

onde:

- $Q$  – Energia térmica produzida, [J],
- $H$  – Energia primária consumida, [J],
- $\eta_Q$  – Eficiência da produção de energia térmica.

$$\eta_{el} = \frac{W}{H}, \text{ Eq.4}$$

onde:

- $W$  – Energia elétrica produzida, [J],
- $\eta_{el}$  – Eficiência da produção de energia elétrica.
- $H$  – Energia primária consumida, [J].

### 2.5.3 Eletricidade produzida

Os valores utilizados para o cálculo de eletricidade produzida em cogeração são determinados com base no funcionamento esperado ou efetivo da unidade em condições normais de utilização. A eletricidade produzida e considerada para um ano pode ser calculada através da Eq.6: [19]

$$E_{CHP} = H_{CHP} \times C, [W] \text{ Eq.6}$$

Onde:

- $E_{CHP}$  – Quantidade de eletricidade produzida, [W],
- $H_{CHP}$  – Potência térmica útil produzida, [W],
- $C$  – Rácio eletricidade/calor, (Ver Anexo 1), [-].

### 2.5.4 Poupança de energia primária

Entende-se por PES a energia primária economizada em cogeração, face à produção de qualquer uma destas formas de energia em separado, energia térmica e elétrica, como expresso na Equação 7: [19]

$$PES = \left( 1 - \frac{1}{\frac{CHP H\eta}{Ref H\eta} + \frac{CHP E\eta}{Ref E\eta}} \right) \text{ Eq. 7}$$

onde:

- PES – Poupança de energia primária, [%],
- $CHP H\eta$  – Eficiência térmica da cogeração cuja definição corresponde à produção anual de calor útil dividida pela quantidade de combustível utilizada na produção total de calor e eletricidade num processo de cogeração,
- $Ref H\eta$  – Valor de referência da eficiência para a produção separada de energia térmica,
- $CHP E\eta$  – Eficiência elétrica da cogeração, cuja definição corresponde à produção anual de eletricidade produzida em cogeração dividida pela quantidade de

combustível utilizada na produção total de energia térmica útil e eletricidade num processo de cogeração,

- $Ref\ E\eta$  – Valor de referência da eficiência para a produção separada de eletricidade.

## 2.6 Quantificação dos fluxos vs índices de desempenho de uma central de cogeração

Consoante o tipo de combustível utilizado na unidade de cogeração: biomassa, biogás, gás natural, gasolina ou *Diesel*, os índices de desempenho desta vão ser diferentes uma vez que os combustíveis possuem diferentes constituintes. Na *Tabela 2* estão representados os valores usuais para a potência instalada, rácio eletricidade/calor, eficiência elétrica e eficiência global, consoante o tipo de tecnologia de cogeração: turbina a vapor, turbina a gás e motores alternativos. [20]

**Tabela 2-Índices de desempenho de uma unidade de cogeração por tipo de instalação.**  
[20]

Tecnologia	Capacidade MWe	Power – to-Heat ratio	Eficiência Elétrica %	Eficiência Global %
Turbina Vapor	0.5-500	0.2-0.8	17-35	60-80
Turbina Gás	0.25-50+	0.6-0.9	25-42	65-87
Motores Alternativos	0.15-20+	0.6-1.0	25-45	65-92

Como presente na *Tabela 2*, consoante o tipo de tecnologia utilizado e de acordo com o tipo de combustível adequado a cada tecnologia, os parâmetros de desempenho característicos também vão ser diferentes.

Numa instalação de cogeração através de uma análise de desempenho termodinâmica e energética, é possível determinar a sua eficiência e desempenho. [20]

Para o sistema invocado o princípio de conservação de energia e o princípio de conservação da massa usando os sobescritos “*i*” e “*o*” para entrada e saída, respetivamente, assumindo que o efeito da variação da energia cinética e potencial é desprezável, e designando as potências mecânicas e caloríficas fornecidas ao sistema, por  $\dot{W}$  e  $\dot{Q}$ , respetivamente, obtém-se: [21]

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o, [\text{kg/s}] \text{ Eq.9}$$

$$-\dot{Q} - \dot{W} = -(\sum \dot{m}_o h_o + \sum \dot{m}_i h_i) [\text{J/s}] \text{ Eq.10}$$

Analizando os termos da equação da conservação da energia dada pela Eq. 10 e considerando a potência mecânica,  $\dot{W}$ , como sendo desprezável, e a variação da entalpia igual ao produto do calor específico a pressão constante pela variação de temperatura sofrida pelo sistema, é possível obter a seguinte expressão para a potência calorífica. [21]

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T [\text{J/s}], [\text{Eq.11}]$$





### 3. Casos de estudo

Por forma a aplicar os conhecimentos mencionados nos capítulos anteriores, realizou-se um estudo aos fluxos energéticos existentes em duas ETAR, incluindo os sistemas de cogeração de cada uma.

As ETAR analisadas são detidas pela SIMRIA, correspondendo o estudo efetuado às ETAR Norte e Sul. Neste âmbito foi, também realizado um estágio na ETAR Sul.

A título informativo, a SIMRIA é uma sociedade anónima de direito privado, responsável pela recolha, tratamento e rejeição dos efluentes domésticos e industriais pertencentes ao sistema multimunicipal de saneamento da Ria de Aveiro e Barrinha de Esmoriz. [22]

A partir do tratamento das águas residuais faz-se o aproveitamento do combustível resultante do processo de digestão anaeróbia das lamas - o biogás, através de um processo de cogeração, onde se produz simultaneamente energia elétrica que é totalmente vendida à rede elétrica nacional, e se utiliza a energia térmica para o aquecimento das lamas que se encontram nos digestores primários com o propósito de produzir o biogás posteriormente utilizado. [23]

Este capítulo apresenta uma breve descrição das ETAR estudadas, assim como o levantamento e consequente compilação dos fluxos energéticos diários e anuais inerentes a cada ETAR para o seu correto funcionamento.

A análise aos fluxos incidiu na produção de energia térmica e de energia elétrica resultantes da queima do biogás, nas necessidades de energia térmica dos digestores para o processamento das lamas, respetivos caudais e temperaturas, nas necessidades de energia térmica inerentes ao aquecimento da água utilizada nos banhos dos balneários de cada ETAR, e correspondentes caudais de água quente e consumos de energia primária - gás natural e necessidades de energia térmica para aquecimento do edifício de exploração.

Da inventariação dos fluxos referentes ao ano de 2013 foram ainda analisados os seus diversos modos de aproveitamento e respetivos desperdícios.

As análises efetuadas tiveram em consideração duas épocas distintas ao longo do ano, em função da temperatura média do ar ambiente (que por sua vez vai influenciar a temperatura média do esgoto e as necessidades de energia térmica do digestor, que tem uma parte da sua superfície exterior em contacto térmico com o ar ambiente). Por isto,

consideraram-se como meses de Verão os meses de Março a Outubro e como meses de Inverno, os meses de Novembro a Fevereiro.

Assim sendo, recorreu-se a um estudo onde foram contabilizados todos os meses do ano e um dia típico de Inverno e Verão, de maneira a quantificar o que se produz, o que se utiliza e o que é ainda passível de ser aproveitado energeticamente, mês a mês e no dia-a-dia.

Relativamente aos fluxos energéticos, importa ainda referir, que os dados relativos à produção e consumo de energia elétrica, produção e consumo de biogás, queima de biogás na tocha e consumo de gás natural nos motogeradores que vão ser apresentados mensalmente, foram disponibilizados pela SIMRIA. Os restantes fluxos de energia: produção, consumo e desperdício de energia térmica, consumo de gás natural nos balneários e potência elétrica consumida para um dia típico de Inverno e Verão, bem como os diversos cenários equacionados foram calculados na sua totalidade.

### **3.1 Caso de estudo A – ETAR Sul**

#### **3.1.1 Breve descrição**

A ETAR Sul localiza-se na freguesia da Gafanha da Encarnação, concelho de Ílhavo, encontrando-se em funcionamento desde Agosto de 2002. Trata os efluentes provenientes de Aveiro (parte), Ílhavo, Mira, Vagos e Cantanhede (parte). [23]

Na ETAR há dois processos de tratamento em paralelo: fase líquida (água residual) e fase sólida (lamas resultantes do tratamento da água residual). Relativamente à fase líquida o processo de tratamento é composto pelas seguintes etapas: pré-tratamento, decantação primária, tratamento biológico e decantação secundária. As lamas resultantes do processo, lamas primárias e secundárias, sofrem um tratamento dividido em três fases: espessamento, digestão anaeróbia e desidratação. Do tratamento da fase sólida resulta a produção de biogás, aproveitável para a produção de energia, e de lamas digeridas e desidratadas, valorizáveis na agricultura (após compostagem). [23]

Os processos acima referidos encontram-se ilustrados na *Fig. 17*, com a seguinte legenda:

- |                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1 – Edifício de pré-tratamento; | 8 – Digestão secundária;             |
| 2 – Decantação primária;        | 9 – Edifício de tratamento de lamas, |
| 3 – Tratamento biológico;       | cogeração e ponto transformação;     |
| 4 – Decantação secundária;      | 10 – Silo de lamas;                  |
| 5 – Estação elevatória IS8;     | 11- Gasómetro;                       |
| 6 – Espessamento de lamas;      | 12- Edifício de exploração/oficinas; |
| 7 – Digestão primária;          | 13 – Portaria.                       |



**Figura 17 -ETAR Sul. [23]**

### **3.1.2 Diagrama de fluxo**

O sistema de cogeração da ETAR Sul é constituído por um grupo eletrógeno, ou seja, por um motor alternativo de combustão interna que se encontra ligado a um gerador elétrico com o propósito de produzir energia elétrica e energia térmica para processo, denominado por motogerador, que utiliza como energia primária o biogás produzido na ETAR ou o gás natural. [22]

O motogerador a funcionar nas condições nominais permite converter 36 % da energia contida no biogás em energia elétrica e, nas condições reais de operação essa percentagem passa a ser 26,9 %, uma vez que não se encontra a funcionar a plena carga devido a imposições legais de produção de energia elétrica (máxima potência elétrica produzida de 250kW). [24]

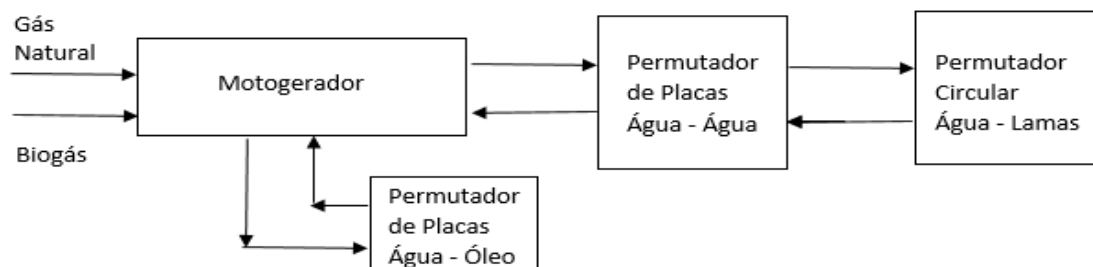
A restante energia é libertada pelo motogerador sob a forma de calor (gases de escape, água de refrigeração do motogerador e, água de refrigeração do óleo do motogerador). Contudo, isto não significa que toda esta energia térmica seja recuperada. Quando o combustível utilizado é o gás natural, o rendimento elétrico nominal situa-se nos 36,6 % e, em condições reais de funcionamento nos 27,6 %, e sendo a restante energia é recuperada sob a forma de calor.

A energia térmica presente nos gases de escape e no circuito de arrefecimento do motogerador é totalmente recuperada nos meses de Inverno. Em meses mais quentes só é aproveitada a energia térmica contida no circuito de arrefecimento do motogerador. Deste modo, a energia contida nos gases de escape do motogerador não é aproveitada em meses de Verão. [24]

A energia térmica proveniente da água de refrigeração do óleo do motogerador é enviada para um reservatório para dissipar essa energia térmica sem qualquer processo de aproveitamento associado.

O princípio de funcionamento desta instalação centra-se na utilização do biogás para alimentar o motor alternativo de combustão interna, que opera a 4 tempos segundo o ciclo Otto, produzindo energia elétrica e rejeitando energia térmica. Em caso de avaria ou paragem do motogerador utilizam-se as caldeiras para suprir as necessidades térmicas dos digestores primários.

Assim, o aproveitamento da energia térmica contida nos gases de escape e na água do circuito de refrigeração do motor é feito para processamento anaeróbio das lamas nos digestores primários, donde resulta o biogás. Todavia, atualmente na ETAR só se encontra um digestor primário em funcionamento, com um volume de 3.000 m<sup>3</sup>. O biogás produzido é posteriormente armazenado no gasómetro, com 1.720 m<sup>3</sup> de volume, onde se encontra à pressão de 20 mbar (que corresponde a 103.351 Pa – pressão absoluta). [22]. Na *Fig. 18*, encontra-se ilustrado o esquema simplificado da instalação de cogeração.



**Figura 18 - Diagrama simplificado do sistema de cogeração.**

Na instalação de cogeração, numa primeira fase o combustível (biogás ou gás natural) é admitido num compressor com um rendimento global de 60 % (mecânico e elétrico), que absorve uma potência elétrica de 0,9 kW, elevando a pressão do gás até 60 mbar (que corresponde aproximadamente a 6.000 Pa relativos), ou seja, à entrada do motogerador é requerida a pressão de 1,06 bar (que corresponde à pressão absoluta de 107.325 Pa) na fase de admissão. Dá-se a combustão e produz-se energia elétrica no gerador elétrico. [22]

A energia elétrica produzida é vendida na sua totalidade à rede elétrica nacional. Dado que a instalação se encontra abrangida pelo regime de venda da energia elétrica produzida em miniprodução, este encontra-se limitada a uma potência máxima de 250 kW.

O aproveitamento da energia térmica dos gases de escape (que se encontram a 390 °C) é feito através de uma caldeira de recuperação de gases onde está incorporada a tubagem proveniente do circuito de arrefecimento do motogerador. Assim, a energia térmica contida nos gases de escape é transferida para a água de refrigeração do motogerador e de seguida encaminhada para um permutador de placas água-água (situado na sala do motogerador, onde se assume que a sua eficiência seja unitária por falta de informação – 100%). Esta água ao passar em contra corrente no permutador troca calor com a água que se encontra a uma temperatura inferior. Esta por sua vez, ao ganhar a energia térmica proveniente dos gases de escape e da refrigeração do motogerador, vai trocar calor para as lamas digeridas num segundo permutador de calor de tipo espiral, neste caso água-lamas digeridas, na sala das caldeiras.

Neste permutador de calor, a água quente ao trocar calor com as lamas digeridas aquece-as. As lamas são posteriormente encaminhadas para o digestor primário.

O caudal de água, de 75 m<sup>3</sup>/h, que circula no permutador de calor circular de tipo espiral, encontra-se disponível, á entrada do permutador, a uma temperatura de 53°C no Verão e de 63°C no Inverno, quando se encontra a funcionar o motogerador. Contudo, esta água já perdeu alguma da sua energia em tubagens e, no permutador de calor, ao aquecer as lamas perde, cerca de 7°C na passagem (diferencial térmico da água no permutador). [24]

Posteriormente e de modo cíclico, a água quente volta novamente ao permutador de placas situado na sala do motogerador para ganhar energia térmica.

Para o processo de aproveitamento de energia térmica descrito anteriormente, quando a temperatura das lamas atinge os 39°C faz-se um *bypass* de cerca de 40% ao caudal de água quente que passa no permutador de calor circular tipo espiral através de uma válvula de três vias (controlo modulante).

Desta forma, a água é encaminhada para circular pelas tubagens das caldeiras dissipando energia e regressando posteriormente ao permutador de calor circular de tipo espiral. Esta energia térmica dissipada (associada à redução de caudal no permutador) não é aproveitada pelo que não será incluída nos cálculos. Todavia, quando esta solução não é suficiente e a temperatura das lamas não diminui, (comprometendo a sua digestão e a refrigeração do motogerador), a água circula em circuito fechado e regressa ao permutador de calor de placas água-água com o intuito de refrigerar o motogerador e assim adquirir calor, é usado um permutador de calor de placas água-água (onde se assume que a sua eficiência seja unitária por falta de informação – 100%) situado na sala das caldeiras e, que tem por objetivo dissipar o calor correspondente ao excesso de temperatura. Este processo tem como intuito estabilizar a temperatura das lamas abaixo dos 39 °C e a própria refrigeração do motogerador.

Neste permutador passa água fria da rede com o objetivo de refrigerar a água que se encontra a uma temperatura mais elevada (esta, ao perder calor, segue novamente para o permutador de calor de placas água-água na sala do motogerador). Este circuito mantém-se em serviço até que a temperatura das lamas e do motogerador diminua para os valores pretendidos.

É ainda de referir que nos meses quentes, em que as necessidades de aquecimento são mais baixas, e uma vez que a instalação produz mais energia térmica do que aquela que é necessária, é efetuado um *bypass* aos gases de escape através de uma válvula de três vias

situada no topo da caldeira de recuperação de gases (controlo modulante). Os gases de escape são diretamente enviados para a atmosfera através da chaminé, ficando apenas o circuito de arrefecimento do motogerador a aquecer as lamas. Este circuito de água é denominado de circuito primário.

O circuito secundário advém do arrefecimento do óleo do motogerador num permutador de calor de placas óleo-água de pequena dimensão (onde também se assume que a sua eficiência seja unitária por falta de informação) situado na sala do motogerador.

O caudal de água de refrigeração é de 16 m<sup>3</sup>/h e encontra-se disponível a uma temperatura de 50°C à entrada do permutador, sendo o diferencial térmico da água no permutador cerca de 7°C na passagem. Após a passagem pelo permutador, este fluxo é encaminhado para um tanque de armazenamento com o propósito de voltar ao circuito de refrigeração, por forma a economizar a água de serviço, perfazendo deste modo um circuito fechado.

Neste circuito não existe o aproveitamento da energia térmica contida na água de refrigeração do óleo do motogerador, tal como referido anteriormente.

Relativamente ao recurso às caldeiras, estas só funcionam em casos excecionais, e não trabalham em simultâneo com o motogerador, pelo que a água que irá circular no permutador de calor circular de tipo espiral encontra-se disponível a uma temperatura de 40°C, com um caudal de 75 m<sup>3</sup>/h.

Analogamente, como a qualidade do biogás produzido se encontra dependente da qualidade da matéria-prima que lhe dá origem (esta tem diversas proveniências e uma composição variável) nem sempre permite a sua utilização no motor de cogeração. Quando assim é existem duas opções: o biogás é encaminhado para as caldeiras onde é queimado e a energia térmica resultante da sua combustão é aproveitada para o aquecimento das lamas (importa referir que a valorização do biogás nas caldeiras só gera energia térmica). Uma segunda opção é a utilização de um combustível de origem fóssil, o gás natural, no motogerador.

O biogás normalmente produzido é então armazenado no gasómetro. Quando este se encontra cheio, por medidas de segurança este combustível é encaminhado para a tocha onde é queimado a uma taxa de 200 Nm<sup>3</sup>/h sem que seja feito qualquer aproveitamento energético dessa queima. [24]



Esta execução de aproveitamento ou rejeição do biogás é inerente a ambas as ETAR que vão ser alvo de análise.

Nos Anexos 2 e 3, encontra-se representado o sistema de cogeração da ETAR Sul.

### **3.1.3 Inventariação/avaliação dos fluxos**

O presente subcapítulo destina-se à inventariação e avaliação dos fluxos, e consequente caracterização dos equipamentos intrínsecos à instalação de cogeração e análise do seu modo de funcionamento.

É de salientar que as especificações de cada equipamento foram retiradas das respetivas fichas técnicas, das condições de projeto, dos dados disponibilizados pela SIMRIA e posteriormente confrontadas com as condições reais de funcionamento.

O sistema de cogeração existente é composto pelos seguintes equipamentos:

- 1 Grupo motogerador
- 1 Compressor de biogás
- 3 Permutadores de calor de placas
- 2 Permutadores circulares de tipo espiral
- 2 Caldeiras
- 3 Bombas de recirculação de lamas
- 3 Bombas de recirculação de água
- 1 Gasómetro de membrana

No sistema de cogeração, o motogerador instalado apresenta uma potência mecânica nominal de 725 kW, a qual foi limitada, aquando da instalação na ETAR, a 92,5% da potência máxima, correspondendo a 669 kW. A potência elétrica máxima real do motogerador corresponde a 636 kW. [24]

Os valores apresentados foram retirados da ficha técnica do equipamento, confrontados com a realidade instalada e com o relatório de operação realizado pela AdP.

Apresentam-se seguidamente as principais características do equipamento de cogeração.

- N.º de motogeradores..... 1
- Marca..... GUASCOR

- Modelo..... FGLD 480/55
- Potência elétrica máxima..... 636kW
- Tensão..... 380 V
- Frequência..... 50 Hz
- Combustível..... Biogás ou gás natural

O rendimento global do motogerador varia, não só em função do combustível (biogás ou gás natural), mas principalmente da carga com a qual opera, conforme se pode verificar pela observação dos valores da *Tabela 3*.

**Tabela 3 – Rendimento global do motogerador da cogeração. [24]**

Carga (% Nominal)	Potência elétrica (kW)	Rendimento global	
		Biogás	Gás natural
100%	689	36,0%	36,6%
80%	539	34,3%	34,9%
60%	392	31,9%	32,2%
40%	261	29,2%	29,7%

Quando alimentado a biogás, o motogerador apresenta um rendimento global máximo de 36%. Para cargas inferiores à nominal o rendimento global diminui consideravelmente. Quando o combustível utilizado é o gás natural, o rendimento aumenta uma vez que o poder calorífico inferior do gás natural é superior ao do biogás, 39,9 MJ/Nm<sup>3</sup> e 22,7 MJ/Nm<sup>3</sup>, respetivamente.

Adicionalmente, por questões relacionadas com condicionalismos legais relativos à licença da instalação para a produção de energia elétrica, que se encontra limitada à potência máxima de 250 kW, para as atuais condições de operação o rendimento elétrico ronda os 29%, caso se esteja a utilizar como energia primário o biogás ou o gás natural.

A energia elétrica média produzida por hora é de 240 kWh, com tensão de interligação á rede elétrica de 15 kV, ou seja, em média tensão. O transformador de energia elétrica possui um rendimento de 85%. [24]

Os dados anteriormente mencionados foram retirados do monitor *display* ligado ao motogerador, do projeto elétrico da ETAR e do relatório realizado pelo grupo AdP.

Relativamente ao consumo de combustível por parte do motogerador, este varia caso se esteja a utilizar como energia primária o biogás ou o gás natural. Para as condições de operação atuais o consumo de biogás é de 124 Nm<sup>3</sup>/h, e o consumo de gás natural é de 80,2 Nm<sup>3</sup>/h. A operar em plena carga consome 171 Nm<sup>3</sup>/h de biogás e 102 Nm<sup>3</sup>/h de gás natural. [24]

É ainda de referir que só se utiliza o gás natural em casos excepcionais, como por exemplo: manutenção do motogerador, ou na ocorrência de algum problema com a digestão anaeróbia das lamas, na qual estas arrefeçam de maneira a ficar comprometida a produção de biogás. Nestes casos recorre-se ao gás natural no sentido de voltar a aquecer os digestores e, conseqüentemente, as lamas, com o intuito de voltar a ter o sistema operacional e a produzir biogás.

Relativamente às caldeiras, estas só entram em funcionamento durante os meses de Inverno. Nos restantes meses só se utilizam em condições de emergência e/ou excepcionais, ou seja, quando o motogerador se encontra em avaria ou em manutenção e estas têm de ser ligadas por forma a não deixar arrefecer as lamas. Atualmente recorre-se unicamente ao funcionamento de uma caldeira (só se encontra um digestor a trabalhar) e apenas em meses de Inverno. Em média, e considerando o funcionamento acumulado das caldeiras, estas trabalham cerca de 1 hora por dia (podendo chegar às 12 horas diárias em casos excepcionais como os descritos anteriormente). Este equipamento pode operar a 1 ou 2 chamas, mas por norma funciona apenas a 1 chama. O consumo de biogás a 1 e 2 chamas é, respetivamente, de 22 Nm<sup>3</sup>/h e 30 Nm<sup>3</sup>/h. A gás natural os consumos são inferiores, 13 Nm<sup>3</sup>/h e, de 18 Nm<sup>3</sup>/h. [24]

Relativamente à pressão de gás requerida à entrada da caldeira, o seu valor é de 20 mbar relativos, que correspondem aproximadamente, a 103.325 Pa absolutos.

Tal como referido anteriormente estes equipamentos funcionam, por norma, somente durante os meses de Inverno. Não só pelas necessidades de aquecimento serem mais acentuadas mas também pela diminuição da produção de biogás que, por vezes, é inferior durante estes meses. Posto isto, é necessária uma maior racionalização deste combustível, e como cada caldeira, comparativamente ao motogerador, consome menos, a sua utilização durante estes meses torna-se bastante aliciante. As características das caldeiras encontram-se descritas de seguida. [24]

- N.º de caldeiras..... 2
- Marca.....VULCANO – SADECA
- Modelo.....EUROBLOC-SUPER-350
- Tipo..... Piro tubular
- Potência calorífica.....407,05 kW
- Rendimento da combustão..... 93%
- Rendimento térmico..... 93%

Voltando aos restantes equipamentos integrantes da instalação de cogeração, importa referir que para suprir as necessidades de energia térmica das lamas e, uma vez que atualmente só se encontra um digestor primário em funcionamento, também só opera um permutador de calor do tipo espiral e, conseqüentemente, apenas uma bomba de recirculação de lamas e uma bomba de recirculação de água. Este permutador de calor possui uma eficiência de 95% (perde 5% da sua eficiência de permuta em trocas de calor com o ar ambiente) e opera com um caudal de água quente para suprir as necessidades de aquecimento das lamas de 75 m<sup>3</sup>/h e um caudal de lamas de 70 m<sup>3</sup>/h.

Para circular a água no permutador anteriormente referido é necessária a utilização de uma bomba de recirculação de água. Esta é uma bomba do tipo centrífugo, possui um rendimento global (elétrico e mecânico) de 66 %, absorvendo uma potência elétrica de 4,77 kW e com um N.P.S.H de 3 m.c.a. Para a avaliação da energia térmica disponível, na água quente, admitiu-se que este equipamento bombeia um caudal nominal de água de 75 m<sup>3</sup>/h. Uma vez que a curva de funcionamento da bomba não se encontra entre as suas especificações técnicas, e em condições reais de operação não é realizado nenhum tipo de estrangulamento ao caudal que passa nas tubagens e na bomba, é também este o valor que se encontra mencionado em condições de projeto.

Relativamente à bomba de recirculação de lamas digeridas, esta também é do tipo centrífugo e possui um rendimento global de 81%, absorvendo uma potência elétrica de 6,1 kW, e com um N.P.S.H. de 2,3 m.c.a. Pelas mesmas razões enunciadas anteriormente para a bomba de recirculação de água quente, o caudal de lamas considerado corresponde ao caudal nominal de 70 m<sup>3</sup>/h.

Os equipamentos anteriormente referidos têm assim por objetivo suprir as necessidades de energia térmica do digestor, mantendo as lamas aquecidas com o intuito de produzirem o biogás pretendido.

Estas necessidades de aquecimento, como vimos anteriormente, variam consoante a altura do ano, isto é, no Inverno são maiores devido às temperaturas médias mais baixas no meio ambiente, que consequentemente vão influenciar a temperatura da água residual. No Verão, pelo contrário, são menores devido ao aumento das temperaturas médias do ar.

Assim sendo, as necessidades de energia térmica para um digestor são de 5.665 kWh/dia no Inverno, e de 3.512 kWh/dia no Verão, consoante dados de projeto para o ano de 2020, sendo o valor das perdas térmicas por digestor de 40,46 kWh/dia. Estes valores não contabilizam os ganhos solares do digestor por exposição direta ao sol. [24]

Optou-se por utilizar os valores estimados para 2020, considerando a possibilidade de um aumento da afluência de caudal de esgoto à ETAR e o consequente aumento do caudal de lamas a aquecer.

Contudo, a afluência de caudal tem sido inferior à estimada devido à crise económica que o país atravessa que tem consequências diretas nos consumos das populações, entre outros fatores. Deste modo e como referido anteriormente, apenas se está a utilizar um digestor primário encontrando-se o outro inativo, dado que o caudal de lamas não é suficiente para alimentar dois digestores.

Posto isto, todas as avaliações e exposições futuras apenas contemplam um digestor.

Os cálculos realizados para a quantificação mensal da produção de energia térmica encontram-se descritos no Anexo 4.

Continuando a análise aos dados referentes ao biogás e ao gás natural (combustíveis utilizados para colmatar as necessidades de aquecimento da ETAR) utilizaram-se as unidades do sistema internacional, ou seja, o [Nm<sup>3</sup>] uma vez que o fluido é um gás e a sua massa volúmica é fortemente influenciada pela pressão e pela temperatura a que se encontra sujeito. Para isso, assumiu-se o biogás e o gás natural como gases perfeitos, e utilizou-se a equação dos gases perfeitos para converter as unidades de m<sup>3</sup> para Nm<sup>3</sup>.

Deste modo, e relativamente à produção de biogás esta é medida através da existência de caudalímetros nos digestores, existindo um para cada digestor.

Analogamente, para medir o consumo de biogás, existe um caudalímetro na tubagem de admissão do motogerador e um caudalímetro na tubagem de admissão de cada caldeira.

Na tubagem da tocha também existe um caudalímetro que mede o caudal de biogás queimado.

Em relação ao gás natural, só existe um caudalímetro comum a toda a ETAR, pelo que o consumo deste combustível é atribuído aos banhos tomados no balneário diariamente, e a alguma utilização de emergência na instalação de cogeração ou nas caldeiras.

O gás natural comprado à rede de gás é, portanto, apenas utilizado na instalação de cogeração em casos de emergência e diariamente no balneário para aquecer a água para os banhos. Este combustível, ao contrário do biogás, chega à instalação com uma pressão de 0,37 bar relativos o que corresponde a uma pressão absoluta de 1,37 bar (considerando que a pressão atmosférica é de, aproximadamente, de 1 bar, o que corresponde a 138.325 Pa) e a uma temperatura de 15°C. Estes dados foram retirados do manómetro e do termómetro que se encontram na tubagem de chegada do gás natural à ETAR. No Anexo 5 encontram-se detalhados os cálculos realizados para a determinação das necessidades térmicas dos balneários e da energia primária (gás natural) utilizada. Cálculos esses que foram efetuados com recurso às faturas da água e do gás natural, de onde se calculou a quantidade de gás natural que é necessário absorver pela quantidade de água utilizada em cada banho. Foi também utilizado o fator de conversão das faturas do gás natural em [kWh/m<sup>3</sup>] para se obter uniformidade nas unidades utilizadas. O esquentador instalado na ETAR possui um rendimento de 93%, e uma potência de 18,5 kW.

É de salientar que os valores das necessidades de aquecimento do balneário, que foram calculados se encontram bastante próximos dos valores reais das faturas que correspondem aos meses em que não se utilizou gás natural na instalação de cogeração. Desta forma, é possível prever que tudo o que se consumiu de gás natural está associado à sua utilização no balneário e a usos pontuais na cozinha da instalação.

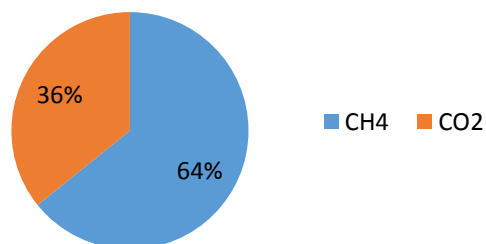
Já as necessidades de energia térmica referentes à climatização do edifício durante os meses de Outubro a Abril, inclusive, possuem o valor de 30,8 kWh/dia e estão a ser colmatadas com recurso a aquecedores elétricos (dado o ambiente corrosivo da ETAR, o sistema de climatização não funciona porque os equipamentos se encontram corroídos).

Nos restantes meses do ano a ventilação natural é suficiente para colmatar as necessidades térmicas do edifício.

Para o biogás, o histórico de resultados analíticos do ano 2013, revela que a composição típica deste combustível produzido na ETAR Sul, e que se encontra representada na *Fig.19*, apresenta uma concentração de CH<sub>4</sub> na ordem dos 64%, o que lhe atribui um poder calorífico inferior de 22,7 MJ/Nm<sup>3</sup>, 34% de CO<sub>2</sub> %, 0,5% de O<sub>2</sub> e 0,019% de H<sub>2</sub>S, que corresponde a 12,7 mgH<sub>2</sub>S/MJ, sendo o limite máximo aconselhado para o bom funcionamento do motogerador de 70 mgH<sub>2</sub>S/MJ, pelo que se revela um valor aceitável.

Diariamente são produzidos em média 1200 Nm<sup>3</sup> de biogás. É ainda de referir que a produção de biogás é superior nos meses considerados de Verão uma vez que o caudal efluente à ETAR contém mais matéria orgânica comparativamente aos meses de Inverno.

Esta diminuição está associada às perdas ao longo das redes, características de períodos com maior precipitação. Desta forma a produção de lamas a digerir no Inverno é menor e, conseqüentemente, a produção de biogás também. [24]



**Figura 19 - Composição do biogás produzido na ETAR Sul.**

Em suma, o biogás produzido na ETAR pode ser valorizado de duas maneiras distintas:

- Com recurso à caldeira, para aquecimento dos digestores;
- Com recurso ao motogerador para produção de energia elétrica e térmica, sendo esta última utilizada para aquecimento dos digestores.

### **3.1.4 Compilação de dados para um ano**

Para avaliação energética da ETAR é necessário responder às seguintes questões: Por quê medir? O que medir? Como medir? Onde medir? Para responder às interrogações acima mencionadas é necessário:

- Quantificar o consumo de energia elétrica,
- A produção de energia elétrica,
- A produção de energia térmica,
- O consumo de energia térmica,
- A produção de biogás e o consumo de biogás,
- O consumo de gás natural,
- A queima de biogás produzido na tocha,
- As necessidades de energia térmica,
- Os diversos modos de aproveitamento energético inerentes às formas de energia geradas.

Para se poderem apresentar e analisar os fluxos energéticos intrínsecos à ETAR, procedeu-se à compilação dos dados referentes ao ano de 2013 e à monitorização, em tempo real, do funcionamento de todos os equipamentos consumidores de energia elétrica da ETAR a partir do painel de monitorização. E também dos respetivos processos de tratamento de águas residuais e sistema de cogeração, que proporciona a valorização energética do combustível produzido – o biogás. Procedeu-se também à compilação de dados referentes a todos os meses do ano, com o intuito de analisar e comparar os valores adquiridos, por forma a obter pareceres claros acerca do funcionamento da ETAR e respetivos modos de gestão e aproveitamento dos diversos fluxos energéticos. Esta análise tem ainda por objetivo apresentar possíveis cenários e propostas de gestão dos variados fluxos produzidos.

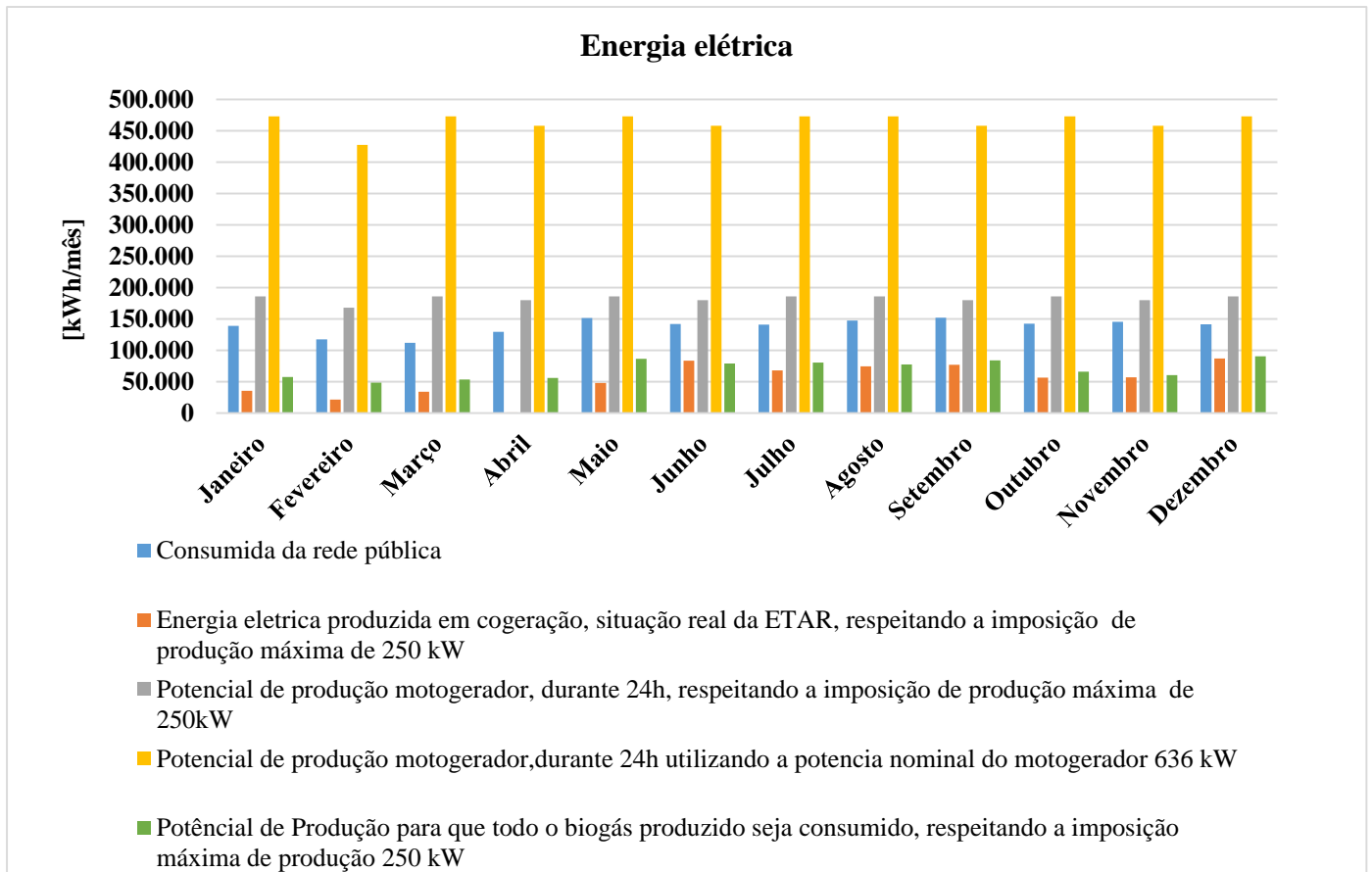
Assim, e por forma a proceder à sua caracterização e comparação, foi efetuado um estudo exaustivo que contempla os diversos fluxos.

De maneira a tornar a apresentação dos dados obtidos mais clara e de mais fácil leitura, os vetores energéticos (anteriormente referidos) foram analisados individualmente e posteriormente comparados. As tabelas efetuadas para os dados analisados foram realizadas em *Excel* e posteriormente convertidas em gráficos (apresentados nos subcapítulos e capítulos seguintes).



### 3.4.1.1 Fluxo energético: energia elétrica

De seguida apresentam-se discriminados os valores referentes ao consumo, produção e possíveis cenários de produção de energia elétrica na ETAR a partir do motogerador (sistema de cogeração), durante o ano de 2013.



**Figura 20 - Representação dos dados referentes à produção, consumo e possíveis cenários de produção de energia elétrica a partir do sistema de cogeração.**

Em média são produzidos por hora em cogeração, tanto nos meses de Inverno como nos meses de Verão, 240 kWh elétricos (por forma a respeitar a imposição legal).

Contudo, pela Fig. 20 é evidente que nos primeiros meses do ano a produção deste vetor energético em cogeração foi diminuta, uma vez que nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março devido a um arrefecimento do digestor registado no mês de Dezembro de 2012, levou a que a produção de biogás só ficasse estabilizada a partir do mês de Maio de 2013, pelo que também só a partir desse mês é que a produção de energia elétrica voltou à normalidade. Relativamente ao mês de Abril, a produção desta forma de energia foi nula

devido à passagem do regime legal, ou seja, até então a energia elétrica produzida em cogeração era, na sua totalidade, utilizada apenas para ajudar a suprir as necessidades de energia elétrica da ETAR. Todavia, como o referido regime não teve a aceitação expectável a nível Nacional foi revogado, mantendo-se apenas em vigor o regime de produção de energia elétrica em miniprodução, onde toda a energia elétrica produzida é vendida à rede elétrica nacional. Por este motivo no mês de Abril não se produziu energia elétrica uma vez que o motogerador esteve parado, por forma a serem realizadas as alterações necessárias para operar de acordo com o novo regime legal.

Nos meses de Outubro e Novembro, devido a ensaios na instalação de cogeração, houve uma diminuição na produção de energia elétrica, sendo que no mês de Dezembro já se encontrava regularizada.

Contudo, tendo sido o ano de 2013 um ano atípico durante alguns meses, em condições normais de funcionamento, e atendendo à produção média diária de biogás, o motogerador trabalha em média 10h/dia, entre as 22h00 e as 08h00, uma vez que é durante a noite que se verificam as temperaturas médias do ar mais baixas e, consequentemente, as trocas (perdas) de calor entre as lamas e a parede do digestor são mais acentuadas. No entanto, este regime horário é suficiente para manter as lamas aquecidas.

Pelo gráfico da *Fig.20*, é ainda visível que a produção mensal de energia elétrica em cogeração apresenta um valor mais baixo, comparativamente ao valor da energia elétrica que é comprada à rede pela ETAR. Porém, e tendo apenas presentes os meses de produção de energia elétrica onde não se verificou nenhum imprevisto, a produção de energia elétrica consegue, por vezes alcançar aproximadamente metade do valor correspondente à energia elétrica que é consumida da rede pública.

Ao longo do ano é visível que o consumo de eletricidade se revelou aproximadamente constante, mesmo nos meses mais quentes, como Julho, Agosto e Setembro, em que a temperatura média ambiente rondou os 22°C. O aumento da temperatura ambiente poderia ter efeitos imediatos no consumo de energia elétrica uma vez que se encontra diretamente relacionado com o tempo de funcionamento das turbinas do reator biológico - processo de tratamento que se encontra dependente do nível de oxigénio existente no caudal de água afluente no reator, e quando a temperatura ambiente sobe existe uma dificuldade acrescida em dissolver o oxigénio na água o que provoca um aumento do tempo de funcionamento deste processo. Este processo de tratamento é

também o que mais energia elétrica consome, representando 54 % do consumo total diário da ETAR para os meses de Verão e 50 % para os meses de Inverno. Como os valores são bastante próximos, 50% e 54%, o aumento do consumo de energia elétrica neste ano em estudo não é evidente no gráfico para os meses do ano em que se verificam as temperaturas mais acentuadas.

Durante os meses onde as necessidades de aquecimento do edifício de exploração ganham expressão, uma vez que as temperaturas médias do ar são mais baixas, também o consumo de energia elétrica podia ter um acréscimo associado. Contudo, tal não se verifica uma vez que existem poucos aquecedores elétricos no edifício (cerca de 4), consumindo cada um deles uma potência de 2 kW. Para além disso não se encontram sempre ligados, e o seu consumo não tem expressão face aos restantes equipamentos consumidores de energia elétrica da ETAR.

Foram também equacionados diversos cenários com o intuito de determinar as capacidades máximas de produção de energia elétrica no sistema de cogeração da instalação. Posto isto, num primeiro cenário foi equacionado o funcionamento do motogerador durante 24h/dia, com a potência máxima legal de 250 kW, todos os dias do ano, pelo que se torna evidente um aumento significativo da produção de energia elétrica.

Num segundo cenário foi analisada a hipótese do motogerador trabalhar a plena carga, ou seja a produzir 636 kW durante 24h/dia, todos os dias do mês, durante todos os meses do ano (neste cenário não foi contabilizada a imposição legal de produção de energia elétrica). No entanto, ambos os cenários, se aplicáveis, têm a capacidade de suprir as necessidades de energia elétrica da ETAR, uma vez que a energia elétrica produzida iria ser superior à que é comprada à rede, resultando ainda um excedente de energia elétrica.

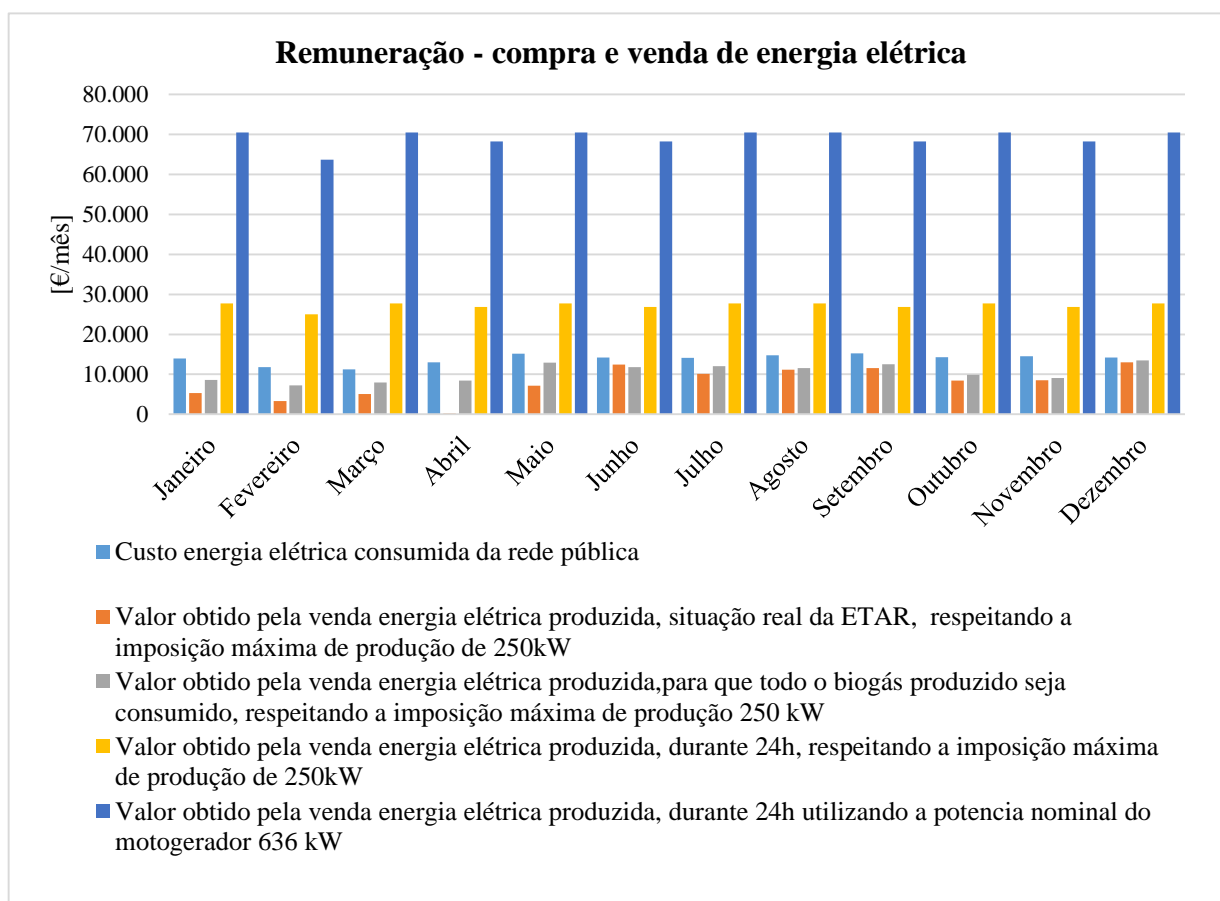
O terceiro cenário considera a utilização de todo o biogás disponível na ETAR para a produção de eletricidade. Deste modo, também foi possível analisar a gestão do biogás na ETAR, pelo que através da *Fig.20* é notório que a partir do mês em que a produção de energia elétrica ficou regularizada (mês de Junho) e até Dezembro (inclusive) é possível verificar que a energia elétrica produzida pela ETAR e a energia elétrica possível de ser produzida, utilizando para esse fim todo o biogás disponível para produção de energia elétrica são bastante próximas. O que reflete uma boa gestão deste combustível na ETAR.

Comparando os diferentes cenários, o mais interessante do ponto de vista energético e da valorização do biogás é o que contabiliza o funcionamento do motogerador

a plena carga durante 24h. Contudo, por impedimentos legais, e por insuficiência de produção de biogás para esse efeito, tal não é viável. Assim, o cenário ideal é o que contabiliza o funcionamento do motogerador a operar de acordo com as imposições legais e durante todo o tempo, admitindo que há produção de biogás suficiente para o efeito.

### 3.4.1.2 Remuneração de compra e venda de energia elétrica.

Neste item pretende-se avaliar e analisar a remuneração mensalmente obtida pela venda de energia elétrica produzida em cogeração. O valor de venda é obtido para cada cenário descrito anteriormente (para a produção de energia elétrica) e o custo associado à compra deste vetor energético para o normal funcionamento da ETAR.



**Figura 21 – Fluxos Financeiros associados à venda e compra de energia elétrica.**

Como já foi referido, o motogerador na ETAR Sul funciona, em média, 10h por dia e, preferencialmente durante a noite. O valor da tarifa remuneratória resultante da venda da energia elétrica produzida no regime de miniprodução à rede elétrica nacional tem o valor

fixo de  $0,149 \text{ €/kWh}$ , ou seja, a tarifa remuneratória é independente do regime horário em que se esteja a produzir energia elétrica no sistema de cogeração. O valor de compra da energia elétrica à rede pública é feito em regime tetra horário diário, em que o preço médio da tarifa de compra é de  $0,10 \text{ €/kWh}$ , pelo que se torna muito mais rentável a venda de energia elétrica. Desta forma, a gestão do consumo do biogás no motogerador tem como principal objetivo o aproveitamento total da produção diária deste combustível, de maneira a que se consiga consumir tudo o que se produz diariamente para produzir energia elétrica.

Assim, a gestão do biogás é feita com o intuito de se conseguir produzir o máximo de energia elétrica possível, que aliada à produção e consequente aproveitamento da energia térmica consegue ainda suprir as necessidades energéticas de aquecimento do digestor.

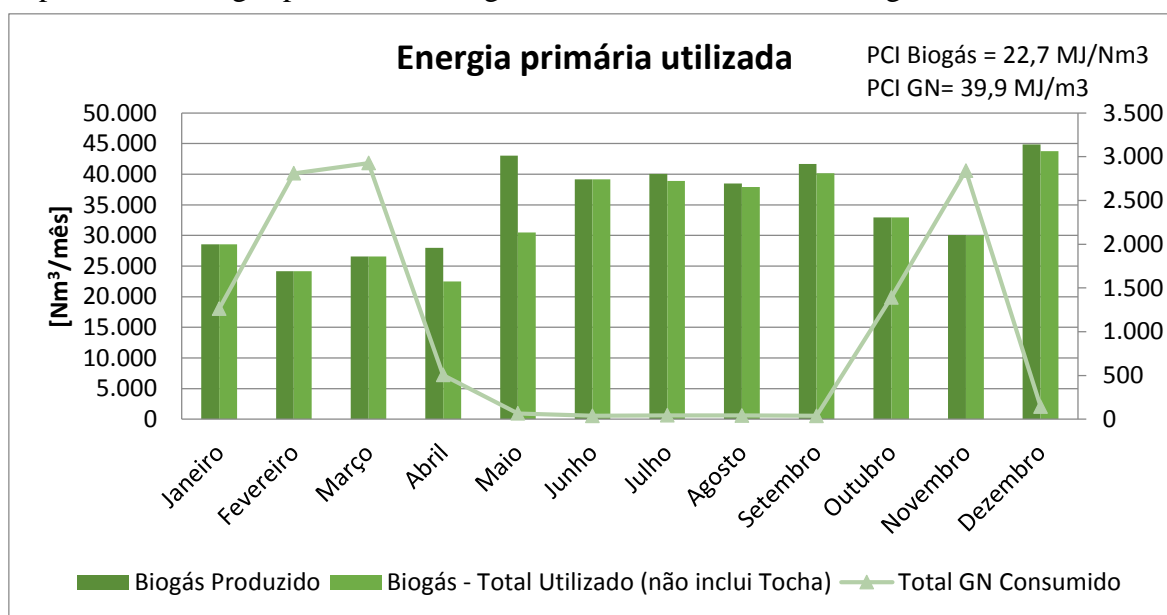
Dado que o preço de venda da energia elétrica é superior ao valor de compra desta energia em 10%, é visível pelo gráfico da *Fig.21* que o montante mensalmente obtido pela venda deste tipo de energia produzida em cogeração é, na maioria dos meses, cerca de metade do valor desembolsado pela compra de energia elétrica à rede. São exemplo os meses de Março, Maio, Outubro e Novembro, existindo ainda alturas do ano, em que a remuneração da venda de energia elétrica quase iguala o valor gasto pela ETAR para a sua aquisição, onde são exemplos os meses de Junho, Julho, Setembro e Dezembro. No mês de Abril, como não se produziu energia elétrica pelo motivo já apresentado, o seu valor de aquisição é nulo. Contudo, o biogás produzido durante este mês foi valorizado nas caldeiras, por forma a não deixar arrefecer as lamas no digestor.

Relativamente aos cenários criados, o mais vantajoso seria o cenário em que o motogerador estaria a funcionar à sua carga nominal, ou seja a produzir 636 kW durante 24h, todos os meses do ano. O cenário representado pelo motogerador a trabalhar a carga parcial, 250 kW, de modo a cumprir as limitações impostas por lei, durante 24h por dia, todos os meses do ano, seria o cenário ideal de funcionamento da ETAR, uma vez que a remuneração obtida pela venda de energia elétrica é superior ao valor gasto na sua compra, o que também se verifica no cenário anteriormente referido. Porém, para este cenário o modo de operação está dentro das condições legais, sendo o único entrave ao seu possível funcionamento o caudal de lamas digeridas não ser suficiente para produzir o biogás requerido para que o motogerador, mesmo em carga parcial, esteja a trabalhar 24h/dia.

Deste modo surge um terceiro panorama relativo à remuneração passível de ser obtida pelo cenário que contempla o aproveitamento total do biogás produzido na ETAR para a produção de energia elétrica no motogerador. Através da *Fig. 21* é notório que os valores obtidos para este cenário se encontram bastante próximos dos valores obtidos para a situação real de remuneração obtida pela venda de energia elétrica. Esta aproximação remete, uma vez mais para uma boa gestão da utilização do biogás para produzir, e consequentemente vender energia elétrica à rede.

### 3.4.1.3 Fluxo energético – energia primária utilizada na ETAR

Para produzir trabalho mecânico/calor na ETAR são utilizadas como energias primárias o biogás produzido na digestão anaeróbia das lamas e o gás natural.



**Figura 22 - Representação gráfica da energia primária utilizada na ETAR.**

O biogás produzido é consumido no motogerador da cogeração, nas caldeiras ou queimado na tocha.

O gás natural é utilizado no balneário do edifício, onde por dia tomam banho 10 funcionários, em casos pontuais na cozinha do edifício ou excecionalmente no motogerador do sistema de cogeração ou nas caldeiras, pelos motivos apresentados no subcapítulo 3.1.3. Desta forma, nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março a utilização do

gás natural é mais evidente devido ao arrefecimento do digestor, pelo que este combustível foi utilizado para o voltar a aquecer. Nos meses de Outubro e Novembro recorreu-se novamente a este combustível devido a ensaios realizados na instalação de cogeração e nas caldeiras.

O consumo de gás natural é mais evidente nos meses “frios”, ou seja, nos meses de Inverno pelo motivo anteriormente apresentado, pelo que, a sua utilização apenas se torna evidente nos meses em que foi utilizado na instalação de cogeração, dado que para suprir as necessidades térmicas dos banhos se consome em média, apenas 7,5 Nm<sup>3</sup>/mês.

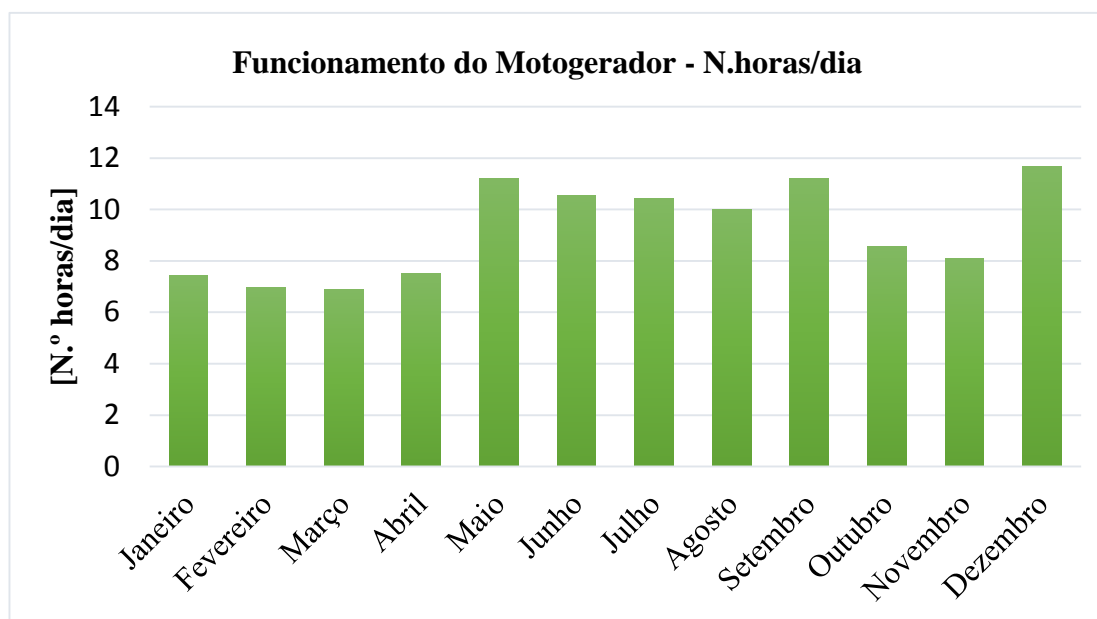
Relativamente à produção de biogás, observando o gráfico da Fig.22 é notável um aumento substancial em meses considerados “quentes” ou, seja, de Verão. Esta variação pode ser justificada devido à diminuição da precipitação nos meses de Verão e, consequentemente, à diminuição das descargas realizadas na rede de esgotos e na própria ETAR. Assim, a matéria orgânica contida no efluente, e que por sua vez dá origem as lamas, encontra-se menos diluída nos meses de Verão. De Janeiro a Março a produção deste combustível sofreu ainda algumas variações devido ao arrefecimento dos digestores, tal como referido anteriormente.

A Fig.22 mostra ainda com clareza que o biogás produzido é praticamente na sua totalidade valorizado, sendo desta forma a fração encaminhada para a tocha quase residual.

Os meses de Abril e Maio foram os períodos do ano onde a queima de biogás na tocha foi mais elevada uma vez que as variáveis do gráfico: “Biogás Produzido” e “Biogás – Total utilizado (não inclui tocha)”, não se igualam, correspondendo essa diferença à porção de biogás que é encaminhado para ser queimado na tocha, sem ter qualquer aproveitamento energético. Os meses de Abril e Maio, referidos anteriormente, foram considerados atípicos devido às alterações executadas na instalação de cogeração, que contemplaram a passagem para o novo regime legal.

Analogamente, e com vista a obter uma boa gestão do combustível produzido na ETAR, torna-se imperativa a valorização total do biogás. Posto isto, procedeu-se ao cálculo do número de horas que o motogerador da instalação de cogeração terá que funcionar para que todo o biogás produzido mensalmente fosse consumindo. Tendo ainda em consideração que o motogerador opera a carga parcial (devido á imposição legal) este consome 124 Nm<sup>3</sup>/h de biogás. Assim, e para que todo o biogás produzido seja consumido (tendo em consideração o ano de 2013 para valores de produção), o número de horas que o

motogerador terá que trabalhar diariamente, cada mês do ano, encontra-se especificado na Fig.23, apresentada de seguida.



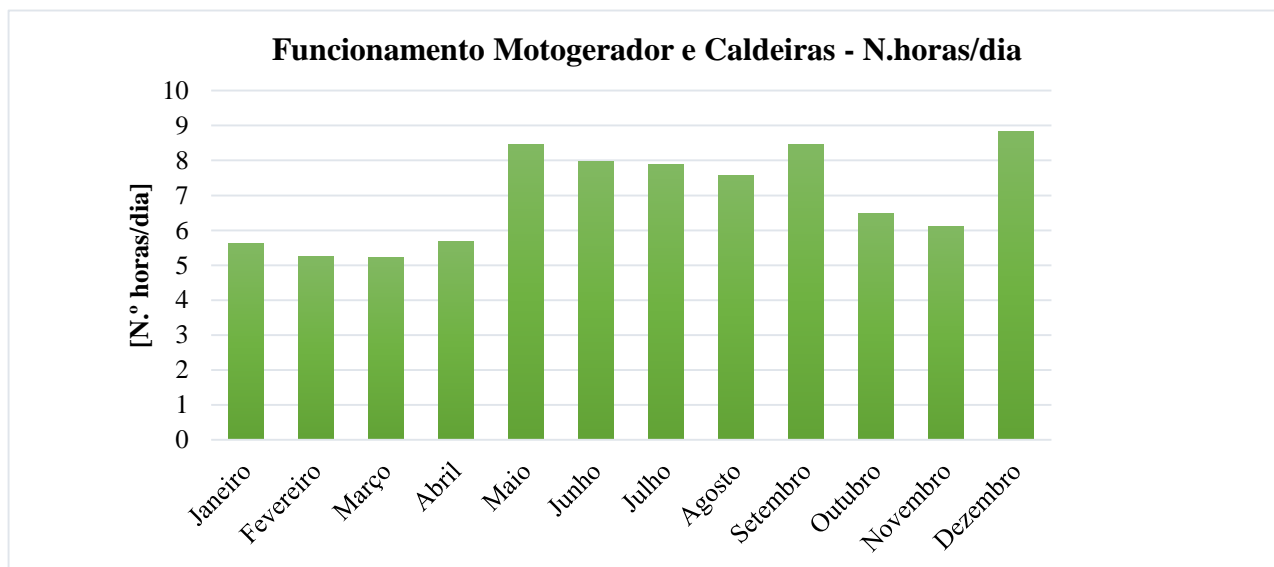
**Figura 23 - Indicação do n.º de horas/dia de funcionamento do motogerador para consumir todo o biogás.**

Através da Fig. 23 é notório que nos meses em que a temperatura média do ar é mais alta, e existe uma diminuição da precipitação, a disponibilidade de utilização de biogás é superior. O mesmo acontece com o número de horas que o motogerador tem que trabalhar para que todo o combustível disponível seja utilizado, sendo o valor médio de funcionamento deste equipamento de 9 h/dia. Importa também referir que existem semelhanças entre o gráfico acima representado, com as variáveis referentes ao consumo e produção de biogás presentes na Fig. 22, o que indica uma boa gestão deste recurso energético na ETAR, uma vez que o biogás produzido é aproveitado quase na sua totalidade.

Posto isto, e tendo em consideração todos os equipamentos passíveis de valorizarem energeticamente este combustível foi novamente realizado o cálculo acima descrito com o intuito de descobrir o número de horas diárias necessárias para que, mais uma vez, todo o biogás produzido seja valorizado. Para este cenário foi contabilizado a utilização das duas caldeiras, a trabalhar a 1 chama (consumo por caldeira 20 Nm<sup>3</sup>/h), durante todos os dias, todos os meses do ano, conjuntamente com o motogerador com a potência de produção limitada a 250 kW (consumo do motogerador 124 Nm<sup>3</sup>/h),



perfazendo um consumo total (motogerador e duas caldeiras) de 164 Nm<sup>3</sup>/h de biogás, pelo que os valores obtidos foram os seguintes.



**Figura 24 - Indicação do n.º de horas/dia de funcionamento do motogerador. [25]**

A *Fig. 24*, evidencia, uma vez mais, uma maior disponibilidade do biogás durante os meses mais quentes, mantendo constantes as parencas face à *Fig.23*. Este cenário pressupõe uma produção inferior de energia elétrica face ao cenário anterior, uma vez que o número médio de horas de funcionamento dos equipamentos é de 7h/dia.

Em contrapartida, prevê um acréscimo da energia térmica produzida, uma vez que há energia térmica disponibilizada pelo sistema de recuperação dos gases de escape, arrefecimento do motogerador e arrefecimento do óleo do motogerador e o acréscimo da energia térmica proveniente das duas caldeiras, pelo que ambos os cenários se mostram interessantes do ponto de vista energético. Contudo esta quantidade de energia térmica disponível, associada ao seu acréscimo de produção não tem qualquer processo de aproveitamento inerente.

#### **3.4.1.4 Fluxo energético – energia térmica**

A energia térmica produzida na ETAR tem origem nos seguintes processos:

- Sistema de cogeração, (inclui aproveitamento da energia térmica contida nos gases de escape, refrigeração do motogerador e refrigeração do óleo do motogerador),
- Caldeiras.

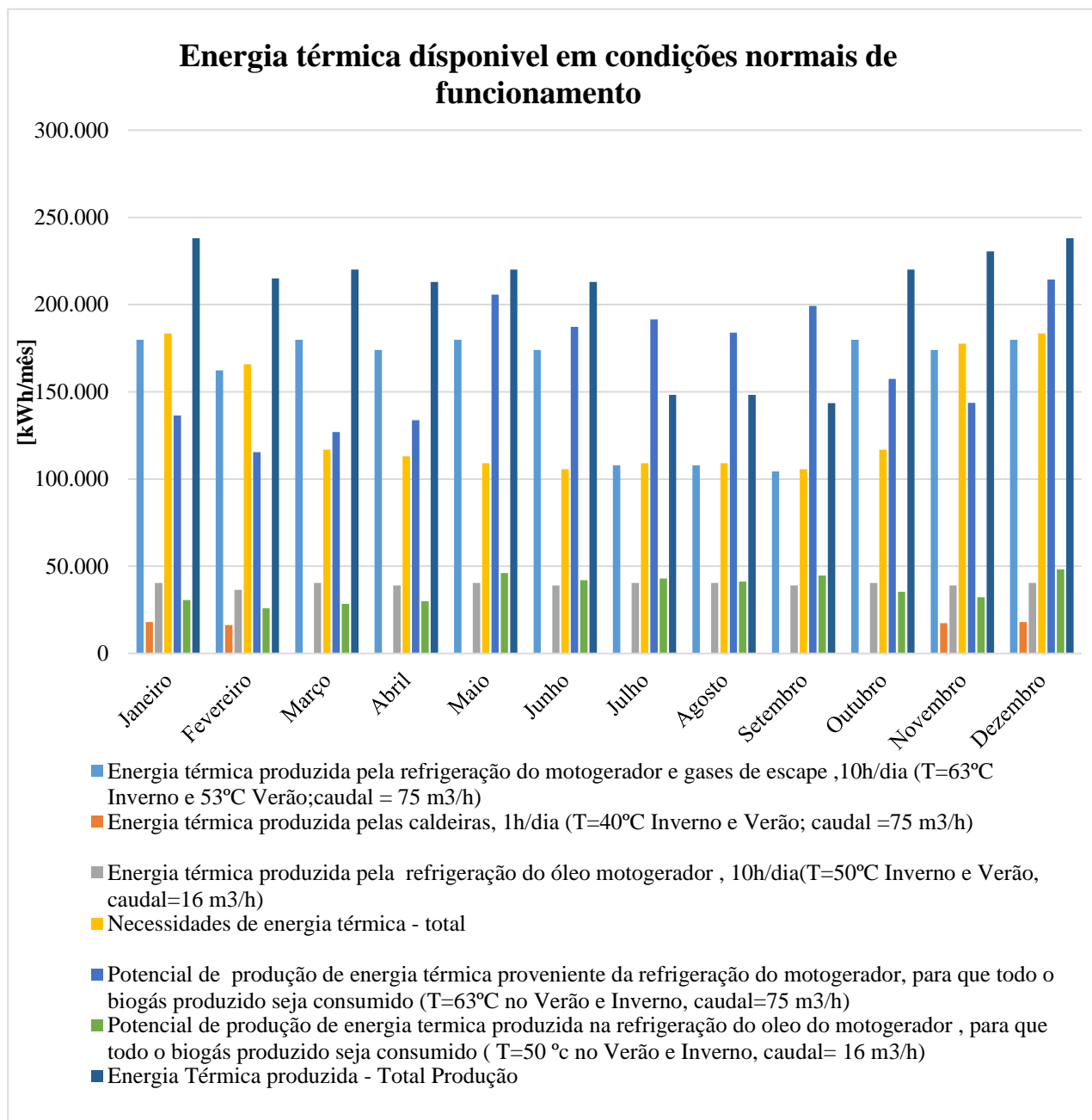
Na *Fig.25* encontram-se evidenciados os fluxos de energia térmica produzidos mensalmente durante o ano de 2013, bem como as necessidades térmicas totais da ETAR (aquecimento dos digestores, utilização de água quente nos balneários e climatização do edifício de exploração). Foi também enquadrado o cenário de produção de energia térmica no motogerador por forma, a que seja consumido todo o biogás que é produzido na ETAR, tendo assim como intuito analisar a gestão deste recurso energético na ETAR (possível quantificação de desperdício).

Todavia, os dados reais referentes à produção de energia térmica durante os meses de Janeiro, Fevereiro, Março e Abril não correspondem às condições normais de funcionamento, ou seja, ao tempo médio de funcionamento dos equipamentos. Sabendo que o motogerador funciona, em média 10h/dia nos meses de Verão e Inverno, e a caldeira 1h/dia e apenas nos meses de Inverno.

Durante os meses referidos anteriormente, a quebra de produção de energia térmica por parte do motogerador deveu-se a um arrefecimento do digestor no mês de Dezembro do ano anterior (o que comprometeu a produção de biogás e, conseqüentemente a sua queima no motogerador), e às alterações realizadas no motogerador para a passagem de regime de autoconsumo para miniprodução. Porém, durante estes meses, como a disponibilidade de biogás era menor recorreu-se algumas vezes ao funcionamento das caldeiras (uma vez que consomem menos biogás do que o motogerador), até que o processo de produção de biogás ficasse estabilizado.

Desta forma, e por ter sido considerado um ano atípico devido a estes imprevistos, para a realização dos cálculos admitiu-se um ano médio relativamente à produção de energia térmica, e não a um ano com anomalias. Até porque durante os meses anteriormente mencionados para além de as caldeiras terem funcionado durante mais tempo do que aquele que está estipulado, o tempo médio de funcionamento das caldeiras mantém-se numa 1h/dia, pelo que mais uma razão para se ter considerado um ano médio e não um ano atípico.

Esta análise teve assim como objetivo quantificar e analisar, para um ano médio, a capacidade de produção de energia térmica por parte da ETAR Sul.



**Figura 25 - Fluxos de energia térmica produzidos e necessidades térmicas da ETAR.**

Pela figura é visível que a energia térmica produzida pelo motogerador varia ao longo dos meses do ano, mantendo-se porém aproximadamente constante nos meses considerados de Inverno. Nos restantes é visível um decréscimo da produção de energia

térmica dado que as necessidades térmicas do digestor são menores em cerca de 30%, face aos meses de Inverno. Nos meses de Julho, Agosto e Setembro é realizado um *bypass* ao caudal de água quente proveniente da refrigeração do motogerador, através de uma válvula de três vias que reduz o referido caudal no permutador de calor circular de tipo espiral em 40%, o que afeta diretamente a produção de energia térmica, assumindo desta forma valores mais baixos nos meses de Verão.

Esta energia produzida pelo motogerador, em meses de Inverno, encontra-se disponível a uma temperatura de 63°C, e no Verão a 53°C, uma vez que é realizado um *bypass* aos gases de escape do motogerador. Para o cálculo da energia térmica disponível foi contabilizado um caudal de água quente de 75 m<sup>3</sup>/h, pelas razões mencionadas no subcapítulo 3.1.3. Apesar de o motogerador funcionar mais tempo no período de Verão seria expetável que também a produção de energia térmica fosse superior, uma vez que se encontra aliada ao seu funcionamento. Contudo, tal não se verifica uma vez que é durante estes meses que não se aproveita a energia térmica dos gases de escape dado que as necessidades térmicas do digestor são menores e ficam supridas com o aproveitamento da água de refrigeração do motogerador. Não sendo necessário a energia térmica disponível nos gases de escape esta não necessita de ser recuperar/aproveitada, pelo que é totalmente rejeitada sem qualquer aproveitamento energético.

Já a energia térmica resultante da refrigeração do óleo do motogerador resulta num caudal de água quente de 16 m<sup>3</sup>/h à temperatura de 50°C. Estes valores foram medidos no permutador de calor de placas óleo-água utilizado para arrefecer este fluido.

Analisando os valores mensais, a energia térmica proveniente da refrigeração e dos gases de escape do motogerador e da caldeira suprem as necessidades térmicas totais (aquecimento do digestor primário, balneário e climatização do edifício de exploração).

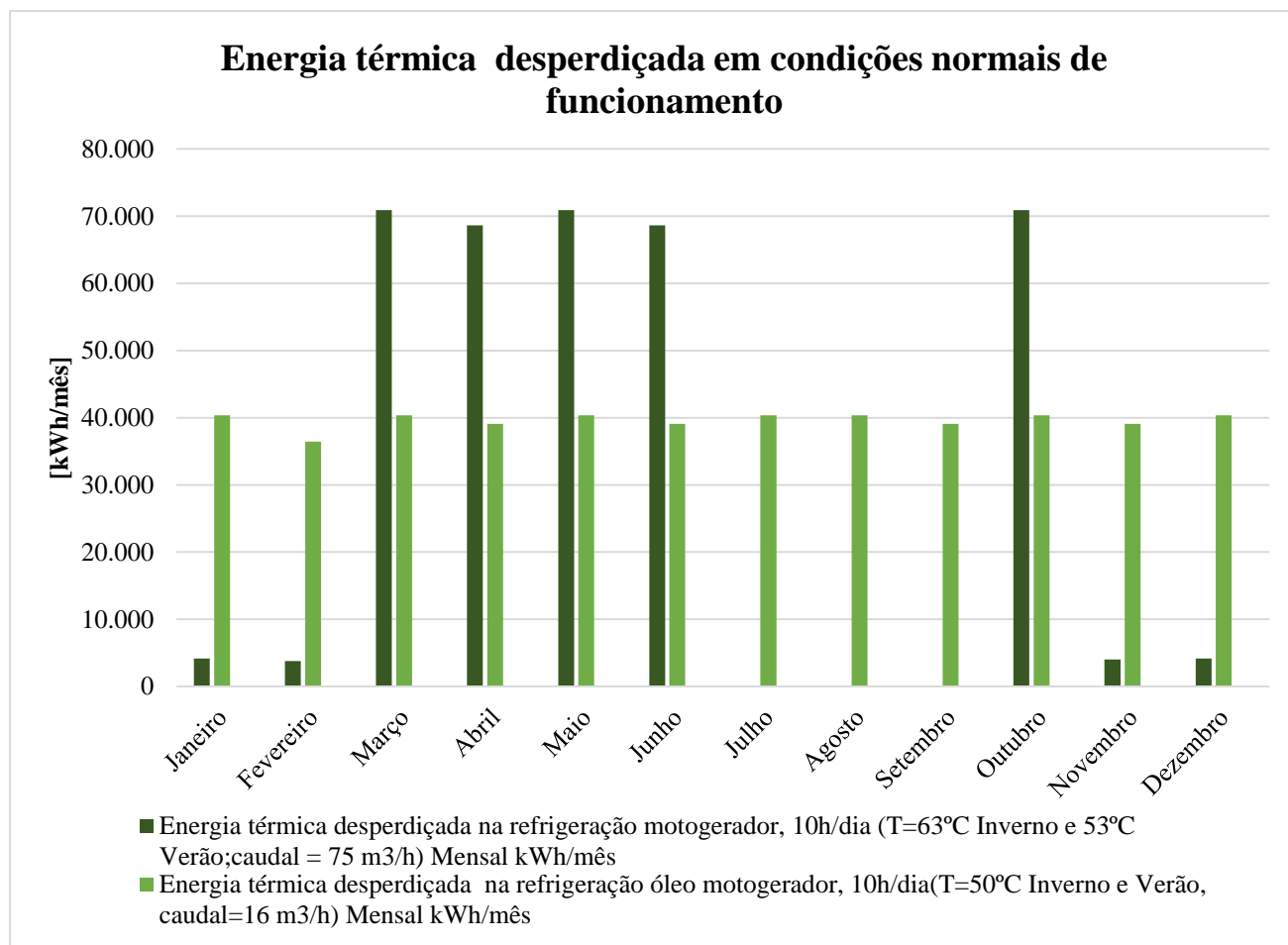
Contudo, e apesar de serem apenas residuais do ponto de vista energético, as necessidades associadas aos banhos tomados diariamente estão a ser colmatadas através da utilização do gás natural. Já as necessidades de aquecimento do edifício estão a ser colmatadas com recurso a aquecedores que consomem energia elétrica.

Relativamente às caldeiras, a energia térmica por estas gerada apresenta um valor substancialmente mais baixo quando comparado com a energia térmica produzida pelo motogerador. Contudo, é de salientar que a caldeira trabalha em média 1h por dia e por

norma em meses de Inverno. Contrariamente, o motogerador trabalha em média, 10h por dia, independentemente da altura do ano.

Comparativamente, os valores obtidos pelo cenário que contempla o potencial de produção de energia térmica por parte do motogerador para que todo o biogás produzido seja aproveitado, face aos valores calculados para a produção de energia térmica tendo em consideração o tempo médio de funcionamento do motogerador (10h/dia) revelam-se ligeiramente superiores. Exceto durante os meses de Janeiro, Fevereiro, Março e Novembro em que se verificaram situações atípicas no sistema de cogeração e de produção de biogás e que já foram referidas anteriormente. Nos meses de Julho, Agosto e Setembro devido ao *by-pass* realizado ao caudal de água quente, a produção de energia térmica baixa consideravelmente.

De seguida, na *Fig. 26* são analisados os desperdícios de energia térmica ao longo do ano de 2013.



**Figura 26 - Energia térmica desperdiçada.**

É mais do que evidente que as necessidades de energia térmica totais apresentam um valor bastante mais baixo do que a energia térmica produzida pelo motogerador. Tendo em linha de conta que essa energia serve apenas para aquecer os digestores, a maioria da energia térmica produzida é por isso desperdiçada!

Uma outra forma de dissipar a energia térmica em excesso é estabelecer que 40% do caudal de água quente ao invés de passar no permutador de calor circular de tipo espiral, onde se dá a permuta de calor com as lamas, passe pelas tubagens das caldeiras durante um período de tempo indeterminado até dissipar calor (temperatura), tal como referido no subcapítulo 3.1.1 (daí o abaixamento de energia térmica produzida nos meses de Julho, Agosto e Setembro). Analogamente, a energia térmica produzida pela refrigeração do óleo do motogerador é, na sua totalidade desperdiçada, ou seja, não tem associado qualquer processo de aproveitamento energético.

Nos digestores, quando as lamas alcançam uma temperatura de 35°C, mantendo-se esta constante, pode dizer-se que as necessidades térmicas do digestor ficam supridas, dado que esta é a temperatura ideal para o processamento da digestão anaeróbia. Contudo, devido ao excesso de energia térmica produzida, as lamas são aquecidas até adquirirem uma temperatura de 39°C, (temperatura máxima tolerável no processo de digestão anaeróbio).

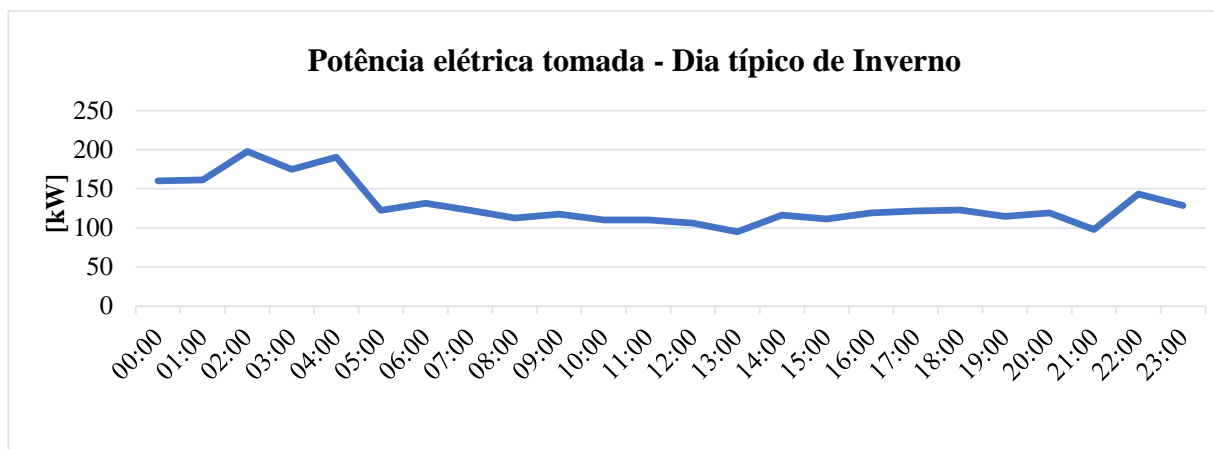
A energia produzida pelas caldeiras não se encontra refletida na *Fig.26*, posto que quando operam toda a energia que produzem é valorizada.

### **3.1.5 Compilação de dados para um dia típico de Inverno e de Verão**

Este subcapítulo tem por objetivo proceder à compilação dos fluxos energéticos já mencionados anteriormente e que têm sido alvo de análise, para um dia típico de Verão e de Inverno. Desta forma foi possível observar a variação destes fluxos, tendo em conta as alturas do dia em que se produzem (manhã, tarde e noite).

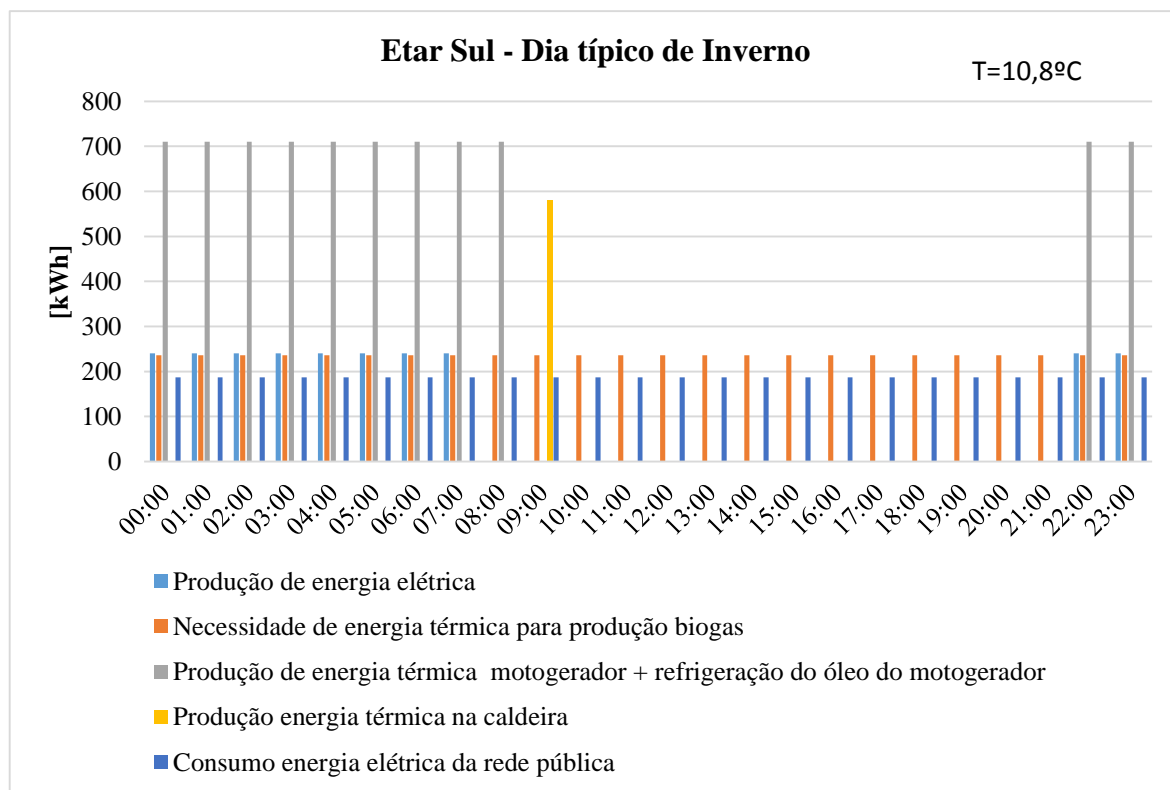
Para isso foi realizada uma tabela diária, minuto a minuto que engloba todos os equipamentos consumidores de energia elétrica intrínsecos à ETAR, por forma a monitorizar com precisão as variações presentes nas diversas alturas do dia e que se referem às necessidades energéticas da ETAR, dado que esta possui mais de 100

equipamentos e a sua maioria liga e desliga, de minuto a minuto. Assim, para um dia típico de Inverno o perfil diário de potência elétrica tomada encontra-se representado na Fig. 27.



**Figura 27 - Potência elétrica tomada na ETAR durante um dia típico de Inverno.**

Para analisar a variação dos fluxos num dia típico de Inverno, considerou-se um dia do mês de Janeiro, onde a temperatura média do ar ambiente ronda os 10,8°C, encontrando-se os respetivos fluxos energéticos representados na Fig. 28 e na tabela 4.

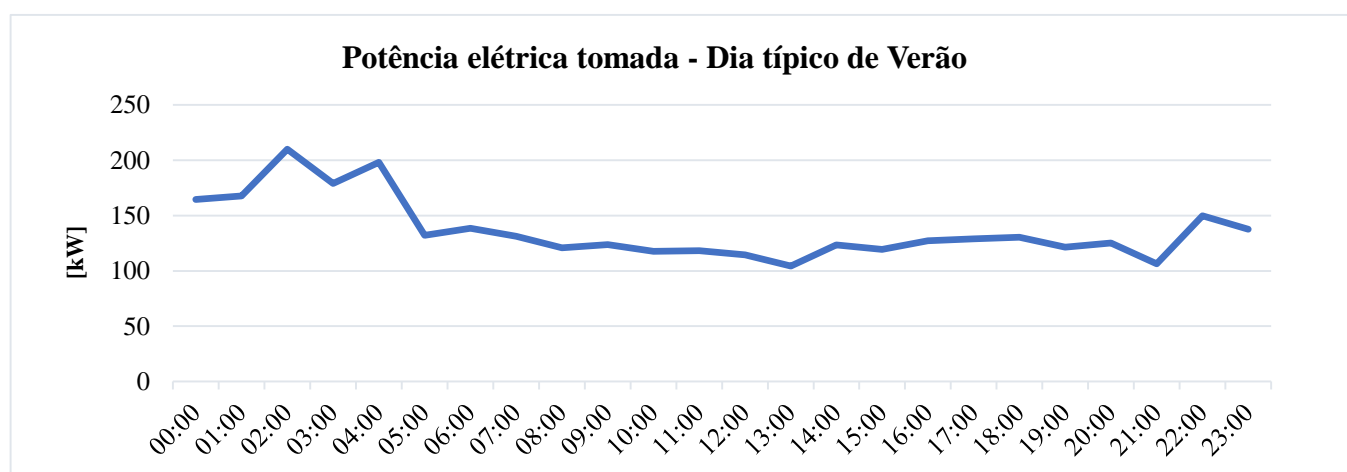


**Figura 28 - Fluxos energéticos inerentes a um dia típico de Inverno.**

**Tabela 4 - Quantificação dos fluxos energéticos.**

Variável	Valor [kWh]
Produção de Energia Elétrica	240
Necessidade Energia Térmica Produção Biogás	236
Produção Energia Térmica Motogerador + Refrigeração do óleo Motogerador	710
Produção Energia Térmica Caldeira	580
Consumo Energia Elétrica Rede Pública	187

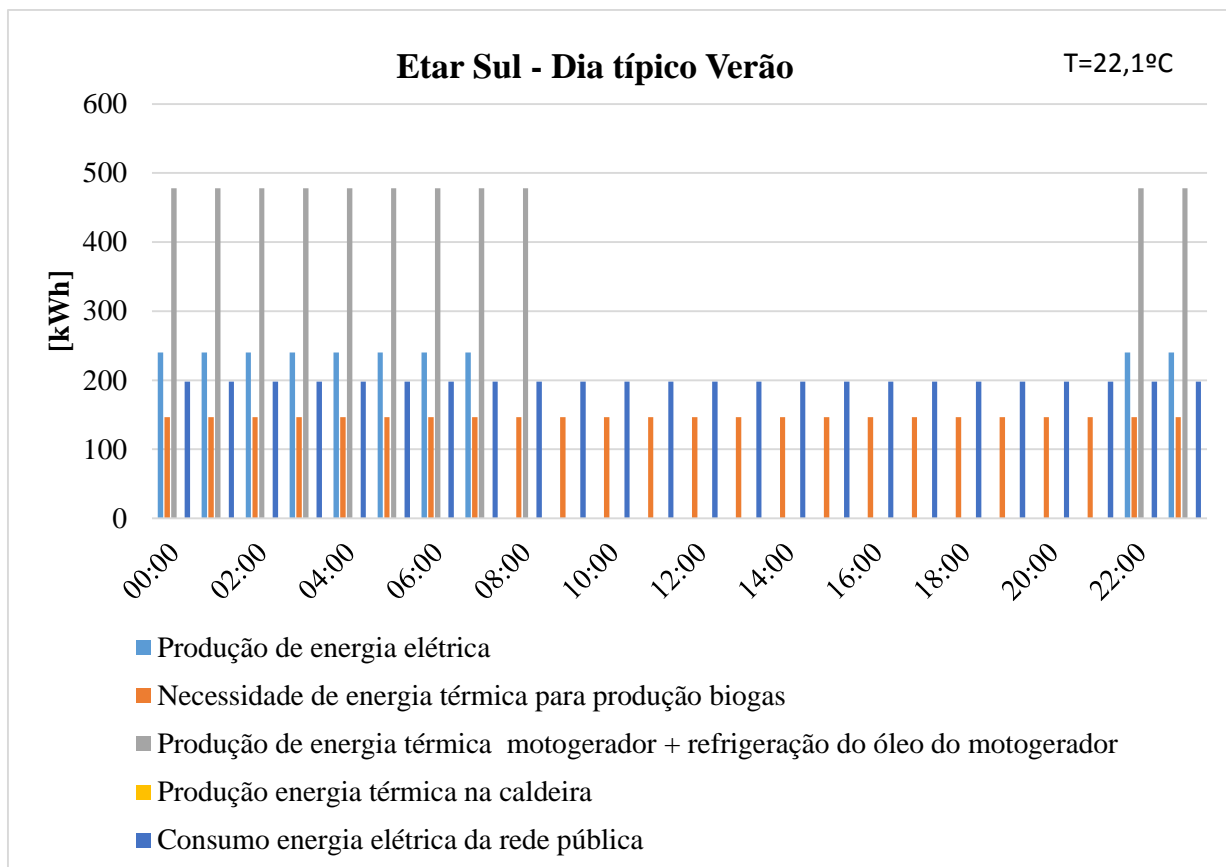
Para analisar um dia típico de Verão, o perfil diário de potência elétrica tomada encontra-se representado na *Fig. 29*.



**Figura 29 - Potência elétrica tomada na ETAR Sul durante um dia típico de Verão.**

Por forma a caracterizar os meses de Verão, considerou-se um dia do mês de Agosto, onde a temperatura média do ar ambiente ronda os 22,1 °C. Os respetivos fluxos energéticos encontram-se representados no gráfico da *Fig. 30* e na *Tabela 5*.





**Figura 30- Fluxos energéticos inerentes a um dia típico de Verão.**

**Tabela 5 - Quantificação dos fluxos energéticos.**

Variável	Valor [kWh]
Produção Energia Elétrica	240
Necessidade Energia Térmica Produção Biogás	146
Produção Energia Térmica Motogerador + Refrigeração do óleo Motogerador	478
Produção Energia Térmica Caldeira	0
Consumo Energia Elétrica Rede Pública	198

Comparando um dia de Inverno com um dia de Verão as maiores diferenças centram-se no consumo de energia elétrica que é significativamente superior para um dia típico de Verão, 187 kWh e 198 kWh respetivamente, uma vez que tem associado o aumento do tempo de funcionamento das turbinas do reator biológico, inerente ao processo de tratamento biológico do caudal afluente.

Já a produção de energia elétrica por hora mantém-se constante tanto para os meses de Verão como para os meses de Inverno, cerca de 240 kW dado que a imposição legal é transversal aos meses do ano, bem como o funcionamento do motogerador.

As necessidades de energia térmica do digestor são menores nos meses de Verão do que nos meses de Inverno, 146 kWh e 236 kWh respetivamente, uma vez que a temperatura média do ar influencia a temperatura média do esgoto.

Relativamente à produção horária de energia térmica nos meses de Verão esta apresenta um valor mais baixo do que em meses de Inverno, uma vez que, apesar de ser produzida a mesma energia térmica, nos meses de Verão a maior parte desta energia é rejeitada por não ser utilizada. Este fato está relacionado com as necessidades de energia térmica serem inferiores nos meses mais quentes, o que faz com que uma parte da energia térmica produzida seja rejeitada (rejeição dos gases de escape e, durante alguns meses, 40% do caudal de água quente). Relativamente à energia térmica produzida nas caldeiras, esta só se verifica, maioritariamente (salvo casos excecionais) nos meses de Inverno como apoio ao motogerador, para o aquecimento das lamas, no entanto a energia térmica produzida por estas é totalmente recuperada de cada vez que este equipamento entra em funcionamento.

## **3.2 Caso de estudo B – ETAR Norte**

### **3.2.1 Breve descrição**

A ETAR Norte localiza-se na freguesia de Cacia, concelho de Aveiro, encontrando-se em funcionamento desde Junho de 2003. Trata os efluentes provenientes de Águeda, Albergaria-a-Velha, Aveiro (parte), Estarreja, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar e a parte de rejeição da Portucel. [25]

O tratamento das águas residuais é feito em dois processos paralelos: fase líquida (água residual) e fase sólida (lamas resultantes do processo de tratamento da água residual). Relativamente à fase líquida, o processo de tratamento é composto pelas seguintes etapas: pré-tratamento, decantação primária, tratamento biológico e decantação secundária. As lamas resultantes do processo, lamas primárias e secundárias, sofrem um tratamento dividido em três fases: espessamento, digestão anaeróbia e desidratação. Do tratamento da fase sólida resulta a produção de biogás, aproveitável para a produção de

energia, e de lamas digeridas e desidratadas, valorizáveis na agricultura (após compostagem). [25]

Os processos acima referidos encontram-se ilustrados na *Fig.31*, com a seguinte descrição:

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 1 – Edifício de pré-tratamento; | 7 – Edifício de tratamento de lamas e cogeração; |
| 2 – Decantação primária;        | 8- Digestão secundária e gasómetro;              |
| 3 – Tratamento biológico;       | 9 – Silo de lamas;                               |
| 4– Decantação secundária;       | 10 – Ponto de transformação e oficina;           |
| 5 – Espessamento de lamas;      | 11– Edifício de exploração.                      |
| 6 – Digestão primária;          |  |



**Figura 31 - ETAR Norte. [25]**

### **3.2.2 Diagrama de fluxo**

O sistema de cogeração da ETAR Norte segue o mesmo princípio de funcionamento que o sistema de cogeração da ETAR Sul descrito no subcapítulo 3.1.1. Assim sendo, e para não tornar a leitura repetitiva e fastidiosa optou-se por indicar apenas as diferenças do seu modo de operação.

Na ETAR Norte o sistema de cogeração é constituído por dois grupos eletrógenos que possuem as mesmas características técnicas e operacionais, utilizando como energia primária o combustível produzido na ETAR - o biogás, ou em casos excepcionais o gás natural. Apesar de esta instalação possuir dois grupos eletrógenos e, consequentemente, dois motores, estes não funcionam em simultâneo devido às imposições e limitações legais de interligação à rede elétrica nacional, uma vez que se ultrapassaria a potência de interligação permitida por lei – 250 kW. Desta forma, funcionam por número de horas de

operação, intercalando o seu funcionamento de maneira a obter um equilíbrio no número de horas em que operam. E em casos de manutenção quando um grupo se encontra indisponível, o outro serve de reserva, pelo que se consegue ter sempre um grupo em funcionamento.

Uma vez que os grupos eletrógenos referidos anteriormente são iguais e têm atribuídas as mesmas limitações técnicas, daqui em diante as características enunciadas para o modo de funcionamento da instalação de cogeração vão ser feitas apenas para um só grupo, tendo sempre presente que os modos de operação e respetivas características são inerentes a ambos.

O motogerador, nas condições nominais de funcionamento, permite converter 36,75% da energia contida no biogás em energia elétrica e, nas condições reais de operação 35,12% (uma vez que o motogerador não se encontra a funcionar a plena carga devido a imposições legais). Quando este se utiliza como combustível o gás natural, no lugar do biogás, não se teve acesso aos dados relativos ao rendimento do motogerador (varia consoante a carga em que opera). [24]

A restante energia deixa o motogerador sob a forma de calor (gases de escape, água de refrigeração do motogerador e água de refrigeração do óleo do motogerador), das quais se aproveita na totalidade a energia presente nos gases de escape e no circuito de arrefecimento do motogerador, tanto nos meses de Inverno, como nos meses de Verão.

Como complemento, a ETAR Norte também possui duas caldeiras que funcionam como reforço à instalação de cogeração, e têm por objetivo ajudar a suprir as necessidades térmicas de aquecimento das lamas dos digestores primários.

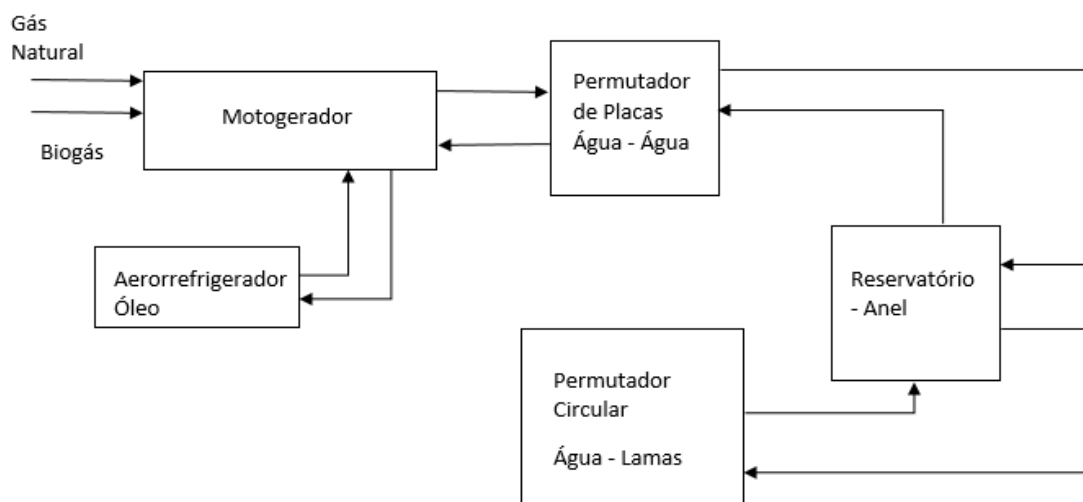
Relativamente ao combustível (preferencialmente) utilizado para alimentar as caldeiras e o motogerador - o biogás, este é produzido nos digestores primários e posteriormente armazenado no digestor secundário que detém um volume de 6.432 m<sup>3</sup>.

O digestor secundário possui na sua cobertura uma membrana flexível que permite, para além de armazenar as lamas provenientes do digestor primário, que este funcione também como gasómetro, armazenando o biogás à pressão de 20 mbar (o que corresponde a 103,351 Pa absolutos). Sabendo que o biogás produzido se encontra dependente da qualidade da matéria-prima que lhe dá origem, nem sempre é possível a sua utilização no motor de cogeração. Desta forma, as medidas tomadas são as mesmas que as enunciadas para a ETAR Sul, descritas no subcapítulo 3.1.2. [22]

Quando o digestor secundário se encontra cheio a válvula de segurança encaminha o biogás para ser queimado na tocha a uma taxa de 250 Nm<sup>3</sup>/h sem qualquer aproveitamento energético. [22]

Na ETAR Norte, como o caudal de lamas é superior ao da ETAR Sul, para o ano de 2013 foi necessária a utilização dos dois digestores primários.

No essencial, as medidas tomadas são as mesmas que as enunciadas para a ETAR Sul, descritas no subcapítulo 3.1.2.



**Figura 32 - Diagrama simplificado do sistema de cogeração da ETAR Norte.**

Uma vez mais, numa primeira fase o combustível é admitido num compressor (para o qual se considerou o rendimento unitário por falta de informação – 100%) que absorve uma potência elétrica de 1,5 kW e que eleva a pressão do combustível até 60 mbar relativos (não se encontra contabilizada a pressão atmosférica). À entrada do motogerador é então requerida a pressão aproximada de 1,06 bar absolutos. [22]

A energia elétrica produzida pelo motogerador é também, na sua totalidade, vendida à rede elétrica nacional, pelo que a instalação de cogeração estando abrangida pelo regime de miniprodução, se encontra limitada a uma potência (máxima) de 250 kW.

O aproveitamento da energia térmica contida nos gases de escape e na água de refrigeração do motogerador segue o mesmo princípio de funcionamento que o descrito anteriormente para a instalação de cogeração da ETAR Sul. No entanto, relativamente ao sistema de aproveitamento da energia térmica para o processo, antes de esta energia (proveniente do motogerador e/ou das caldeiras) trocar calor com as lamas no permutador de calor circular de tipo espiral situado na sala das caldeiras, é inicialmente encaminhada

para uma tubagem em forma de anel que funciona como reservatório (também situado na sala das caldeiras).

De seguida, a água armazenada neste reservatório em forma de anel é encaminhada pelas bombas de recirculação de água quente para os permutadores de calor circular de tipo espiral com o intuito de aquecer as lamas (sendo estas posteriormente enviadas para os digestores primários).

A água que circula no permutador de calor circular de tipo espiral encontra-se disponível à entrada deste equipamento com um caudal de 110 m<sup>3</sup>/h e com uma temperatura de 50°C no Inverno e 46°C no Verão, e a 50°C quando se encontra só a caldeira a funcionar, independentemente de se estar a considerar para o funcionamento desta os meses de Inverno ou de Verão.

Importa também referir que a água quente ao passar no permutador de calor circular de tipo espiral perde alguma da sua energia térmica ao aquecer as lamas, que se traduz numa diminuição da sua temperatura, em cerca de 5°C nessa passagem.

Assim e de modo cíclico após o aquecimento das lamas no permutador de calor circular de tipo espiral, a água quente é novamente bombeada para o reservatório em forma de anel e daí encaminhada para o permutador de placas (situado na sala dos motogeradores), pela bomba de recirculação de água ao motogerador, para recuperar uma vez mais o calor proveniente da refrigeração do motogerador e dos gases escape. Daí segue novamente, para o reservatório perfazendo o circuito anteriormente mencionado. Deste modo, o reservatório funciona como ponto de partida e de chegada da água de aquecimento.

No caso de estarem em funcionamento as caldeiras, depois de trocar calor no permutador de calor circular de tipo espiral com as lamas a água quente é bombeada novamente para as caldeiras, através da bomba de recirculação de água às caldeiras.

Ao contrário da ETAR Sul, a ETAR Norte não possui um permutador de calor para dissipar o excesso de energia térmica caso se atinja uma temperatura demasiado elevada na tubagem de água quente, ao invés cada grupo motogerador possui um permutador de calor de placas água-água (água da rede) de emergência para o caso do motogerador entrar em sobreaquecimento.

Para além disso, a ETAR possui um sistema de electroválvulas instaladas na rede de tubagem de água quente que se encontra ligada ao permutador de calor circular do tipo espiral.

Estas válvulas possuem um *set-point* definido referente à temperatura máxima que a água pode atingir por forma a não aquecer em excesso as lamas e, conseqüentemente, a comprometer a produção de biogás. Assim, quando a água atinge a temperatura de 70°C é realizado um *bypass* aos gases de escape provenientes do motogerador, e caso a caldeira esteja em funcionamento é desligada por forma a baixar a temperatura da água.

Contudo, durante o ano, muito raramente se efetua um *bypass* aos gases de escape através da válvula de três vias situada no topo da caldeira de recuperação de gases, pelo que se aproveita toda a energia térmica contida nos gases de escape e na refrigeração do motogerador. Este circuito de água é denominado de circuito primário.

O circuito secundário advém do arrefecimento do óleo do motogerador num aerorrefrigerador situado do lado de fora do edifício da instalação de cogeração. Todavia, não se teve acesso a qualquer tipo de informação (características técnicas) deste equipamento. Neste circuito, a água utilizada para o arrefecimento do óleo depois de arrefecida é novamente bombeada para o motogerador, com o intuito de voltar a aquecer. Esta energia resultante da refrigeração do óleo do motogerador encontra-se disponível a 47°C (temperatura indicada pelo monitor *display* do motogerador), com um diferencial térmico de 7°C no permutador com um caudal de água de 30 m<sup>3</sup>/h. Porém, não existe qualquer tipo de aproveitamento da energia térmica disponível na água de refrigeração do óleo do motogerador.

No Anexo 6 encontra-se representado o sistema de cogeração da ETAR Norte.

### **3.2.3 Inventariação/avaliação dos fluxos**

Este capítulo destina-se à avaliação e inventariação dos fluxos e à caracterização dos equipamentos intrínsecos à instalação de cogeração da ETAR Norte e respetivo modo de operação, sendo de salientar que as especificações de cada equipamento foram retiradas das fichas técnicas, das condições de projeto e dos dados disponibilizados pela SIMRIA, tendo sempre em consideração as condições reais de funcionamento da ETAR.

Desta forma, optou-se numa primeira fase por descrever o sistema de cogeração existente, composto pelos seguintes equipamentos:

- 2 Grupos motogeradores
- 3 Compressores de biogás
- 4 Permutadores de placas
- 2 Permutadores circulares tipo espiral
- 2 Caldeiras
- 3 Bombas de recirculação de lamas
- 3 Bombas de recirculação de água quente
- 2 Bombas de recirculação de água ao motogerador
- 2 Bombas de recirculação de água às caldeiras
- 1 Digestor secundário/gasómetro

No sistema de cogeração, o motogerador instalado apresenta uma potência mecânica nominal de 330 kW, a qual foi limitada, aquando da sua instalação na ETAR, a 97% da sua potência máxima, correspondendo a 316 kW. A potência elétrica máxima real do motogerador corresponde a 314 kW. [22]

Os valores apresentados foram retirados das especificações técnicas do equipamento e, posteriormente confrontados com a realidade.

Apresentam-se de seguida, as principais características do equipamento de cogeração.

- N.º de Motogeradores ..... 2
- Marca..... GUASCOR
- Modelo..... FGLD 240/55
- Potência elétrica máxima..... 330 kW
- Tensão..... 380V
- Frequência..... 50Hz
- Combustível..... Biogás ou gás Natural

O rendimento do motogerador varia consoante a carga e consoante o combustível utilizado. Contudo, como não se teve acesso aos dados para o rendimento global do motogerador quando se utiliza como energia primária o gás natural estes não foram



considerados. Na *Tabela 6* apresentam-se os rendimentos globais relativos ao motogerador quando utiliza como combustível o biogás produzido na ETAR.

**Tabela 6 - Rendimento elétrico do motogerador quando o combustível utilizado é o biogás. [22]**

<b>Carga nominal (%)</b>	<b>Potência elétrica [kW]</b>	<b>Rendimento global %</b>
100%	330	36,7%
80%	264	35,5%
60%	198	33,6%
40%	132	30,4%

Quando alimentado a biogás, o motogerador apresenta um rendimento global máximo de 36,7% e para o gás natural, apesar de não se ter acesso aos respetivos valores, o rendimento do motogerador deverá ser superior uma vez que o poder calorífico deste combustível é mais elevado do que o do biogás, 39,9 MJ/Nm<sup>3</sup> e 22,7 MJ/Nm<sup>3</sup>, respetivamente. Os valores do poder calorífico inferior atribuídos a cada um dos combustíveis utilizados são os mesmos para a ETAR Sul e Norte. Em relação ao biogás, como a matéria afluente às ETAR é bastante idêntica, este combustível possui, aproximadamente, a mesma composição típica (razão pela qual se atribui o mesmo poder calorífico). Relativamente ao gás natural este é comprado a um comercializador, sendo transportado pela rede nacional, pelo que as propriedades consideradas para este combustível foram as mesmas para as duas ETAR.

O consumo de combustível por parte do motogerador, para as condições de operação atuais são de 113 Nm<sup>3</sup>/h de biogás e de 69 Nm<sup>3</sup>/h de gás natural. A operar a plena carga, estes valores são incrementados para 146 Nm<sup>3</sup>/h de biogás e 87 Nm<sup>3</sup>/h de gás natural. [22]

É ainda de referir, que à semelhança da ETAR Sul, só se utiliza o gás natural em condições excecionais, tal como indicado no subcapítulo 3.1.3.

Adicionalmente, por condicionalismos legais relativos à produção de energia elétrica, a potência injetada na rede encontra-se limitada a 250kW, para as atuais condições de funcionamento o rendimento elétrico ronda os 35% caso se esteja a utilizar como energia primária o biogás.

Relativamente à energia elétrica média horária, à semelhança da ETAR Sul, é de 240 kWh, com tensão de interligação à rede de 15 kV, ou seja, em média tensão. O transformador de energia elétrica possui, igualmente, uma eficiência de 85%. [22]

Importa referir que os dados anteriormente mencionados foram retirados do monitor *display* que se encontra ligado ao motogerador, do projeto elétrico da instalação, e do projeto de cogeração da ETAR.

Relativamente à utilização das caldeiras nesta ETAR, estas operam com bastante regularidade tanto em meses de Inverno como em meses de Verão uma vez que as necessidades de aquecimento das lamas para a produção de biogás são mais elevadas, comparativamente à ETAR Sul.

As caldeiras podem então operar a 1 ou 2 chamas, mas por norma funcionam a 1 chama. Em condições normais de funcionamento opera apenas uma só caldeira. O consumo de biogás a 1 e a 2 chamas é de 27 Nm<sup>3</sup>/h e 64 Nm<sup>3</sup>/h, respetivamente. A gás natural os consumos são de 16 Nm<sup>3</sup>/h e de 38 Nm<sup>3</sup>/h, para 1 e 2 chamas, respetivamente.

As características das caldeiras encontram-se descritas de seguida. [22]

- N.º de Caldeiras..... 2
- Marca..... VULCANO – SADECA
- Modelo..... EUROBLOC-SUPER-350
- Tipo..... Piro tubular
- Potência calorífica..... 407,05 kW
- Rendimento da combustão..... 93%
- Rendimento térmico..... 93%

É ainda importante referir que no ano de 2013 estiveram a funcionar os dois digestores primários, bem como os dois permutadores circulares do tipo espiral e, conseqüentemente, duas bombas de recirculação de água quente para bombear a água do anel para cada permutador, uma bomba de recirculação de água para o motogerador, uma bomba de recirculação de água às caldeiras, duas bombas de recirculação de lamas digeridas, uma para cada permutador, duas bombas de envio de lamas aos digestores, sendo uma bomba para cada digestor. É de salientar que só funcionam todos os equipamentos enumerados anteriormente caso estejam a trabalhar em simultâneo a caldeira

e o motogerador. Caso contrário, só se encontram em funcionamento os equipamentos intrínsecos a cada um deles, ou seja, se estiver a trabalhar apenas a caldeira, estão associados os seguintes equipamentos: dois permutadores de calor, uma bomba de recirculação de água à caldeira, a bomba de recirculação de água quente do anel ao permutador de calor circular, duas bombas de recirculação de lamas digeridas, duas bombas de envio de lamas aos digestores (funcionam duas bombas de recirculação e duas bombas de lamas porque se encontram a trabalhar os dois permutadores).

Quando funciona apenas o motogerador, a única diferença relativamente aos equipamentos que operam aquando do funcionamento da caldeira é que em vez de funcionar a bomba de recirculação de água à caldeira funciona a bomba de recirculação de água ao motogerador, mantendo-se todos os outros operacionais.

Relativamente aos equipamentos anteriormente mencionados, os permutadores de calor, com uma eficiência de 95%, possuem um caudal de água quente para suprir as necessidades energéticas das lamas digeridas de 110 m<sup>3</sup>/h, e um caudal de lamas digeridas de 112 m<sup>3</sup>/h. Para bombear a água para os permutadores anteriormente referidos é necessária a utilização de duas bombas de recirculação de água. Estas são do tipo centrífugo, e cada uma delas possui um rendimento global (elétrico e mecânico) de 71%, um N.P.S.H. de 8 m.c.a e absorvem uma potência elétrica de 2,72 kW. Tendo em consideração a curva característica da bomba, às condições reais de funcionamento cada uma bombeia um caudal de água de 110 m<sup>3</sup>/h.

As bombas de recirculação de lamas aos permutadores de calor circular de tipo espiral também são do tipo centrífugo e cada uma possui um rendimento global de 71 %, absorvendo uma potência elétrica de 5,33 kW, com um N.P.S.H. de 8 m.c.a. Tendo em conta a sua curva característica, nas condições reais de funcionamento também bombeiam um caudal de lamas de 110 m<sup>3</sup>/h. [22]

Os equipamentos até agora referidos têm por objetivo colmatar as necessidades de energia térmica de cada digestor primário. Desta forma, para os meses de Inverno as necessidades de energia térmica dos dois digestor são de 13.608 kWh/dia e para os meses de Verão de 12.900 kWh/dia - consoante dados de projeto para 2018. Optou-se então por utilizar os valores estimados para 2018 devido ao possível aumento da afluência de caudal à ETAR. Contudo, esta afluência, tal como na ETAR Sul, tem sido inferior à esperada.

O valor referente às necessidades térmicas de cada digestor teve em consideração a época do ano e as perdas térmicas, no valor de 319 kWh/dia. Para o cálculo das necessidades térmicas não se contabilizaram os ganhos solares por digestor, dada a sua exposição direta ao sol.

Relativamente aos cálculos efetuados referentes à produção de energia térmica por parte da instalação de cogeração e das caldeiras, e das necessidades térmicas inerentes aos banhos, recorreu-se à metodologia adotada para a ETAR Sul que se encontra descrita no subcapítulo 3.1.3. Todos os cálculos relativos à produção de energia térmica para a ETAR Norte encontram-se no Anexo 4.

Relativamente à produção de biogás, esta é medida através de caudalímetros nos digestores primários, um por digestor. Analogamente, para medir o seu consumo, existem dois caudalímetros no sistema de cogeração, um para cada motogerador, e um caudalímetro comum às duas caldeiras. Na tubagem da tocha também existe um caudalímetro, com o objetivo de quantificar a quantidade de biogás que é aí queimada. Em relação ao gás natural, existe apenas um caudalímetro para toda a ETAR, pelo que tudo o que se gasta é atribuído aos banhos tomados nos balneários diariamente, e a alguma utilização excecional na instalação de cogeração ou nas caldeiras. Este combustível chega à instalação com as mesmas características de pressão e temperatura enumerados para a ETAR Sul no subcapítulo 3.1.3.

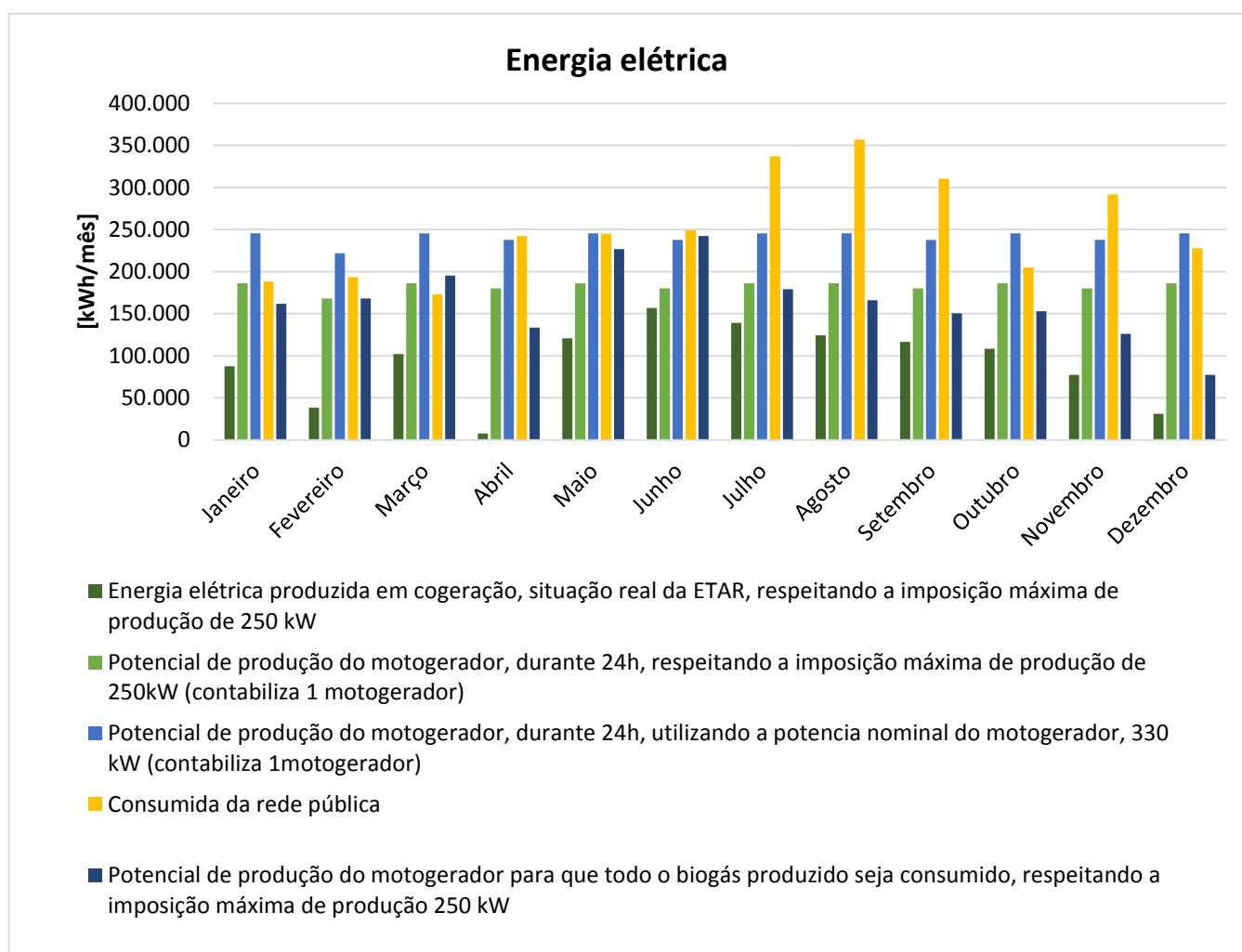
### **3.2.4 Compilação de dados para um ano**

Seguindo o que foi feito no subcapítulo 3.1.4 para a ETAR Sul, para se poder analisar e quantificar os fluxos energéticos intrínsecos à ETAR Norte efetuou-se uma compilação de dados referentes ao ano de 2013 e à monitorização em tempo real do funcionamento de todos os equipamentos consumidores de energia elétrica da ETAR a partir do painel de monitorização dos respetivos processos de tratamento das águas residuais e da instalação de cogeração. Desta forma, foi possível efetuar uma análise comparativa clara sobre o funcionamento da ETAR e respetivas metodologias de gestão dos diversos fluxos energéticos: consumo e produção de energia elétrica, produção e necessidades de energia térmica, consumo e produção do biogás, consumo do gás natural, e apresentação de possíveis cenários de gestão desses recursos.

Assim, e a partir dos gráficos de seguida apresentados foi possível efetuar uma análise quantitativa e comparativa entre os diversos fluxos energéticos, obtendo-se os resultados descritos na secção 3.2.4.1 seguinte.

### 3.2.4.1 Fluxo Energético: Energia Elétrica

Em média, tanto nos meses de Verão como nos meses de Inverno a produção horária de energia elétrica, em cogeração é de 240 kWh.



**Figura 33 – Representação dos dados referentes à produção, consumo e possíveis cenários de produção de energia elétrica a partir do sistema de cogeração.**

Da *Fig. 33* é evidente um aumento da produção de energia elétrica nos meses de Verão, principalmente desde Maio até Setembro, encontrando-se definido que o motogerador funcione cerca de 20h/dia e as caldeiras as restantes 4h/dia, todos os dias do mês, durante os meses considerados de Verão. Nos meses de Inverno o motogerador opera 10h/dia e as caldeiras 14h/dia, o que faz com que haja uma diminuição da produção de eletricidade nos meses considerados mais frios.

No mês de Fevereiro houve um decréscimo da produção de energia elétrica devido a avarias nos dois motogeradores. Já no mês de Abril esse decréscimo deveu-se às intervenções realizadas na instalação para passar do regime de autoconsumo para o regime de venda de energia elétrica. Em Dezembro a produção de eletricidade sofreu um novo decréscimo um por motivo de manutenção, e também por avaria do motogerador. Por essas razões, a produção de energia elétrica e térmica pelo motogerador ficou comprometida durante este mês. Deste modo, os meses em que a produção de energia elétrica se encontra regular são os meses de Maio a Outubro.

É também perceptível que a energia elétrica produzida em cogeração não supre as necessidades elétricas da ETAR, ou seja, compra-se mais energia elétrica à rede, comparativamente ao que se produz na ETAR. Todavia, nos meses de Março, Junho e Outubro a energia elétrica produzida revela-se, aproximadamente mais de metade da energia elétrica consumida (face às necessidades elétricas da ETAR nesses meses).

Em Julho, Agosto e Setembro, o consumo de energia elétrica revela-se bastante elevado. Este aumento encontra-se relacionado com a temperatura média ambiente que durante estes meses regista valores mais altos, cerca de 22°C. Deste modo e pelas razões enumeradas no subcapítulo 3.1.4, o aumento do consumo de energia elétrica no Verão está associada ao funcionamento das turbinas do reator biológico de forma mais intensa, associadas ao processo de tratamento do reator biológico. Este processo é o que consome mais energia elétrica na ETAR, representando 71 % do consumo total diário em meses de Verão, e 57% nos meses de Inverno.

Nos restantes meses do ano o consumo de energia elétrica mantém-se aproximadamente constante. E uma vez mais, durante os meses de Outubro a Abril, onde as necessidades de aquecimento do edifício de exploração ganham expressão, uma vez que as temperaturas médias do ar são mais baixas, também o consumo de energia elétrica podia ter um acréscimo associado. Contudo, tal não se verifica uma vez que existem poucos

aquecedores elétricos no edifício (cerca de 4). Para além disso não se encontram sempre ligados e o seu consumo não tem praticamente expressão, cada um consome uma potência de 2 kW, face aos restantes equipamentos consumidores de energia elétrica da ETAR.

Os cenários equacionados e representados na *Fig. 33* tiveram como objetivo evidenciar as capacidades máximas de produção de energia elétrica por parte do motogerador na instalação de cogeração.

Assim num primeiro cenário considerou-se o funcionamento do motogerador durante 24h, a produzir 250 kW, todos os dias de cada mês, durante todos os meses do ano, pelo que é evidente um aumento significativo da produção de energia elétrica. Num segundo cenário considerou-se o motogerador a trabalhar a plena carga, ou seja, a produzir 330 kW durante 24h, todos os dias do ano. Este cenário teve por objetivo quantificar e demonstrar a capacidade máxima de produção de energia elétrica por motogerador instalado no sistema de cogeração.

No terceiro cenário analisou-se a energia elétrica passível de ser produzida de modo a que todo o biogás seja valorizado energeticamente no motogerador. Contudo, através da *Fig. 33* é visível que a energia elétrica que é produzida mensalmente na ETAR fica aquém da capacidade real de produção de energia elétrica, face à disponibilidade do biogás existente na ETAR Norte, ou seja, existe uma gestão fraca dos recursos energéticos, uma vez que o biogás que não é utilizado para produzir energia elétrica e térmica, é encaminhado para a tocha sem qualquer tipo de aproveitamento energético associado.

É importante referir que os valores apresentados para cada cenário são referentes à produção de apenas um motogerador, uma vez que estes apresentam as mesmas características e limitações e, para além disso, por motivos legais só pode funcionar um motogerador de cada vez.

Comparando os cenários equacionados, o mais favorável tanto do ponto de vista energético como da valorização do combustível produzido seria o cenário em que o motogerador estaria a operar a plena carga, durante 24h sob 24h, ou seja, sem limitações legais e assumindo que o biogás produzido é suficiente para o motogerador operar nestas condições. Contudo, por imposições legais tal não se pode verificar pelo que o cenário ideal seria o que o contempla o motogerador a trabalhar 24h sob 24h a carga parcial – 250

kW, tendo em consideração que o biogás produzido é, na maioria dos meses, suficiente para a instalação operar nestas condições.

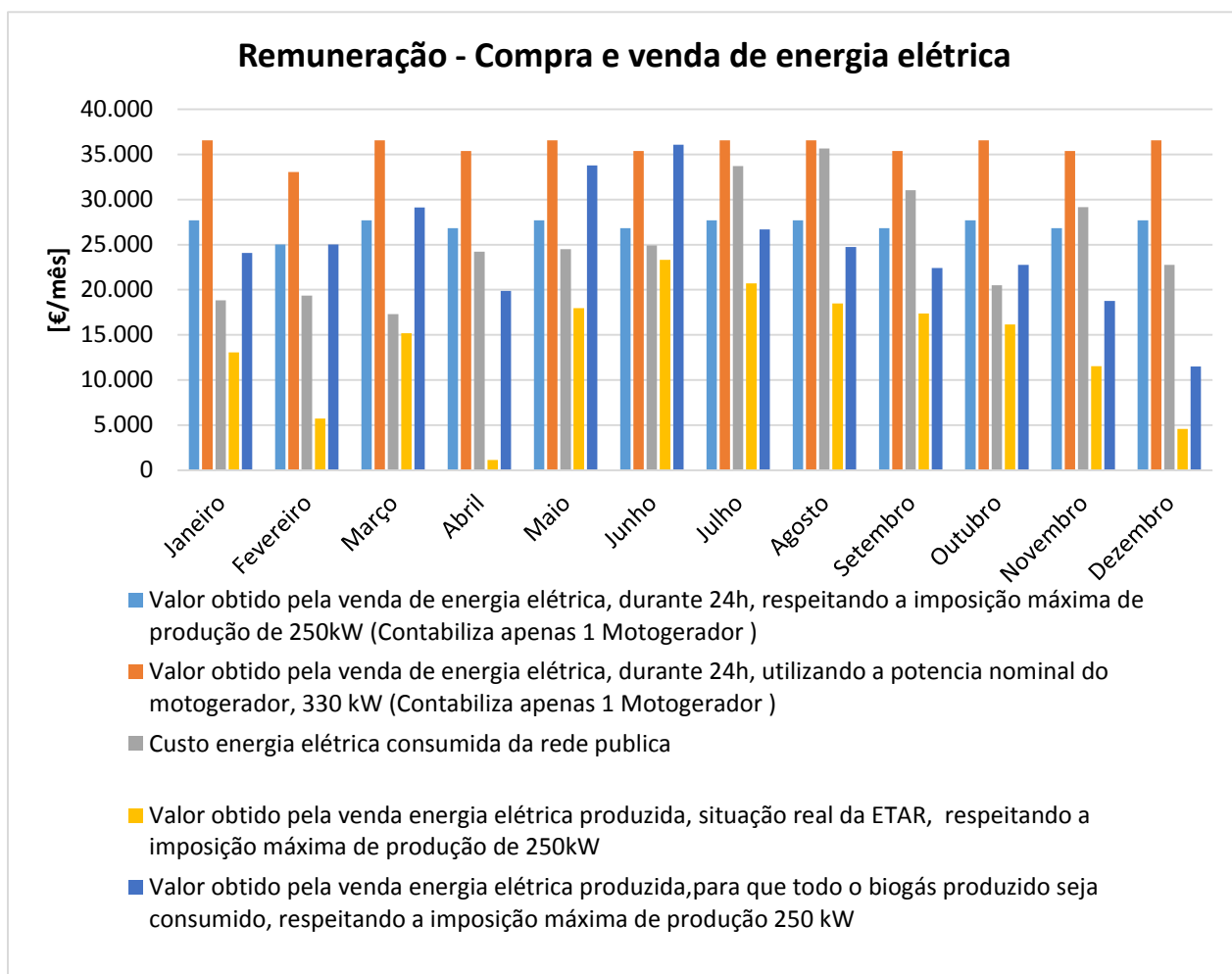
Deste modo, e comparando os cenários acima descritos, com o consumo de energia elétrica da ETAR no ano de 2013, estes revelam-se bastante interessantes do ponto de vista energético, uma vez que, suprimem ou igualam na maioria dos meses as necessidades de energia elétrica da ETAR.

### **3.2.4.2 Remuneração de compra e venda de energia elétrica**

Na *Fig. 34* pretende-se demonstrar a remuneração mensalmente obtida pela venda de energia elétrica produzida em cogeração, em condições normais de funcionamento. O valor de venda que é obtido para cada cenário descrito anteriormente (para a produção de energia elétrica) e o custo associado à compra deste vetor energético para o normal funcionamento da ETAR.

Os valores de compra e venda da energia elétrica à rede são os mesmos que os aplicados à ETAR Sul, e que se encontram especificados no subcapítulo 3.1.3.





**Figura 34 – Fluxos financeiros associados à venda e compra de energia elétrica da ETAR Norte.**

Analisando o gráfico é perceptível que os montantes mensalmente adquiridos pela venda de energia elétrica produzida em cogeração nas condições normais de funcionamento (com exceção dos meses de Fevereiro, Abril e Dezembro, pelos motivos já reportados) ultrapassam, na maioria das vezes, metade do valor desembolsado pela compra de energia elétrica à rede. São disso exemplos os meses de Janeiro, Maio, Julho, Agosto, Setembro, Outubro e Novembro. Nos meses de Junho e Março os valores adquiridos quase que igualam o valor de compra.

Relativamente aos cenários considerados, o mais vantajoso seria o que contabiliza o motogerador a funcionar à carga máxima, ou seja, a produzir 330 kW, durante 24h por dia, todos os meses do ano. Contudo, por motivos legais tal não é possível. Assim sendo, o cenário que contempla o funcionamento do motogerador segundo as imposições legais de produção de energia elétrica e durante 24 h, todos os dias, e todos os meses do ano, seria o

cenário ideal uma vez que se conseguiria atingir a produção máxima de energia e daí obter a maior remuneração possível, tendo em consideração a imposição legal de produção. Este cenário é igualmente atrativo do ponto de vista da disponibilidade do biogás, dado que na maioria dos meses existe biogás suficiente para o motogerador estar a funcionar 24h/dia. Nos meses em que tal não fosse possível, o importante do ponto de vista energético, seria aproveitar todo o biogás para a produção de energia elétrica e térmica.

Dos cenários propostos, apenas o primeiro ultrapassa o valor mensalmente despendido para o consumo de energia elétrica. Contudo, no segundo cenário só nos meses de Julho, Agosto e Setembro é que o valor adquirido pela venda de energia elétrica é inferior ao valor gasto na sua aquisição.

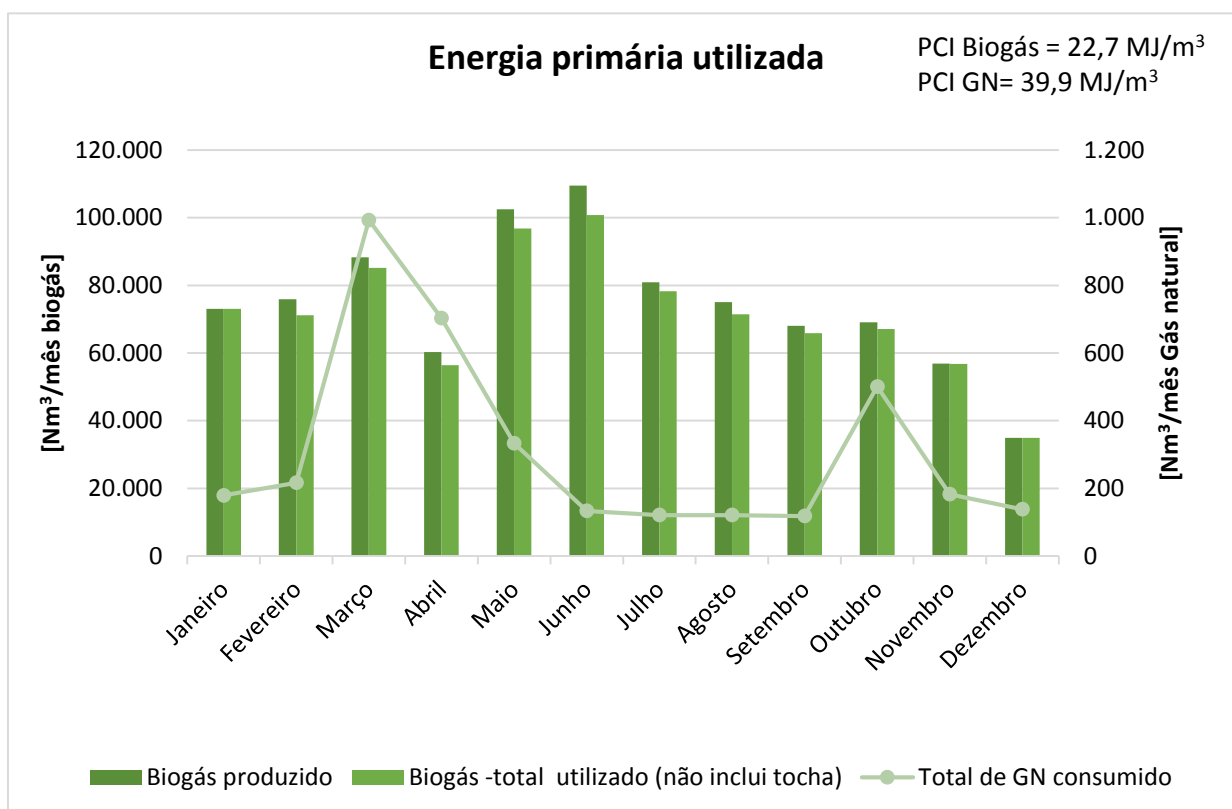
No cenário que contabiliza o aproveitamento total do biogás produzido, nos meses de Abril, Julho, Agosto e Setembro, o valor obtido pela venda de energia elétrica à rede é inferior ao valor gasto na sua aquisição.

Tal como referido anteriormente, os principais entraves ao funcionamento de cada cenário são: a instalação de cogeração estar abrangida pelo regime legal de miniprodução o que limita a produção a uma potência elétrica de 250 kW, e a disponibilidade do biogás.

#### **3.2.4.3 Fluxo energético – Energia primária utilizada**

Na ETAR Norte, à semelhança da ETAR Sul, as energias primárias utilizadas são o biogás produzido na instalação e o gás natural adquirido à rede.

O biogás produzido na ETAR é consumido nos motogeradores da instalação de cogeração, nas caldeiras ou é queimado na tocha, neste caso sem qualquer aproveitamento energético. O gás natural é utilizado nos balneários, onde por dia tomam banho cerca de 14 funcionários ou, excecionalmente, nos motogeradores e caldeiras, pelas razões enunciadas no subcapítulo 3.2.3. Esta ETAR possui também uma máquina de lavar loiça, e só em casos pontuais é que se utiliza o gás natural para aquecer a água na cozinha do edifício.



**Figura 35 - Representação gráfica da energia primária utilizada na ETAR Norte.**

Analisando a *Fig.35*, a utilização de gás natural torna-se mais evidente nos meses de Março, Abril, Maio e Outubro, uma vez que foi utilizado na instalação de cogeração. Nas restantes alturas do ano a utilização deste combustível não tem praticamente expressão, uma vez que só se está a contabilizar os gastos associados às necessidades de energia térmica dos banhos, que consomem em média cerca de 25 Nm<sup>3</sup>/mês valor este residual comparativamente aos restantes.

Nos meses de Março, Abril e Maio o consumo de gás natural deveu-se às adaptações necessárias que tiveram de ser feitas na instalação de cogeração para passar do regime legal de autoconsumo para o regime de miniprodução, e aos respetivos ensaios nos motogeradores. Já no mês de Outubro a sua utilização deveu-se ao suprimento de eventuais necessidades de aquecimento das lamas.

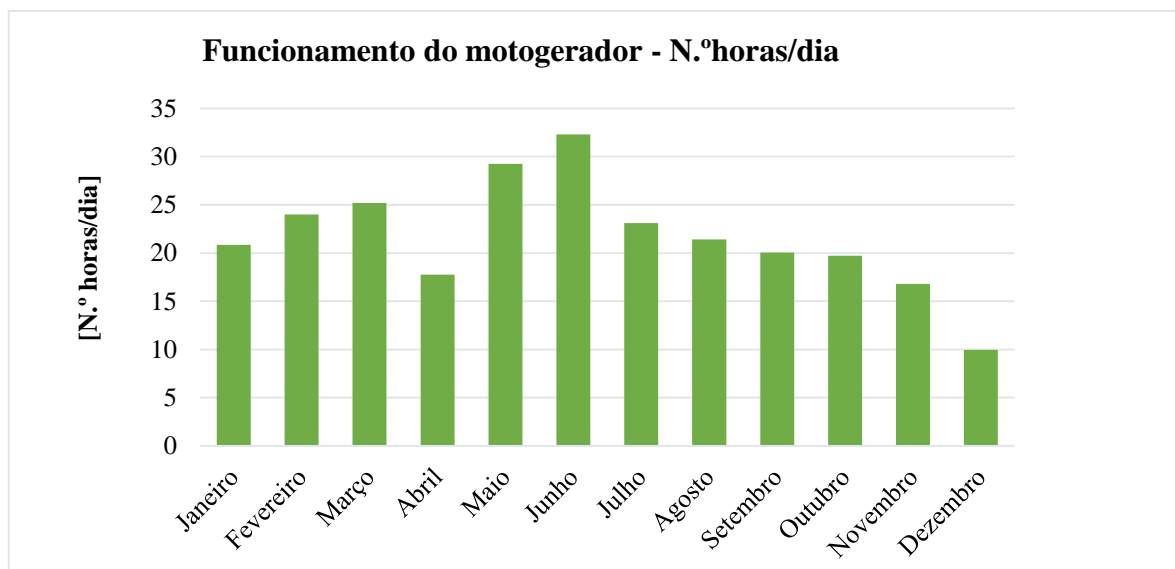
Relativamente ao biogás, este combustível só foi totalmente valorizado nos meses de Janeiro, Novembro e Dezembro. Nos restantes meses do ano o seu aproveitamento total não se verificou, o que significa que a diferença entre as variáveis representadas na *Fig.36* como “Biogás – Total Produzido” e “Biogás- Total utilizado (não inclui tocha) ”

corresponde ao biogás que foi encaminhado para a tocha sem qualquer aproveitamento energético. Este desperdício foi mais acentuado nos meses de Fevereiro, Março, Abril, Maio, Junho e Outubro.

Durante o mês de Maio e Junho a produção de biogás foi superior à capacidade de consumo, pelo que, também é nestes meses que se regista a maior quantidade de biogás queimado na tocha.

No que respeita à produção deste combustível, esta revela-se aproximadamente constante, com exceção dos meses de Abril e Dezembro, atingindo o ponto mais baixo de produção no mês de Dezembro dado que um dos motogeradores avariou e o que se encontrava de reserva estava em manutenção, pelo que as lamas arrefeceram, tendo comprometido a produção do biogás. Em Abril, pela razão já enunciada, a produção de biogás também foi mais baixa comparativamente aos outros meses. Nos restantes meses do ano, seja Verão ou Inverno, não se consegue visualizar uma correlação entre a produção de biogás e os meses em que a temperatura média ambiente é mais elevada e, consequentemente, a do esgoto também. Contudo, é numa das alturas mais quentes do ano que a produção deste combustível atinge o seu pico (Maio e Junho) diminuindo gradualmente a partir daí. Na ETAR Norte não é tão evidente o aumento da produção de biogás por motivos processuais.

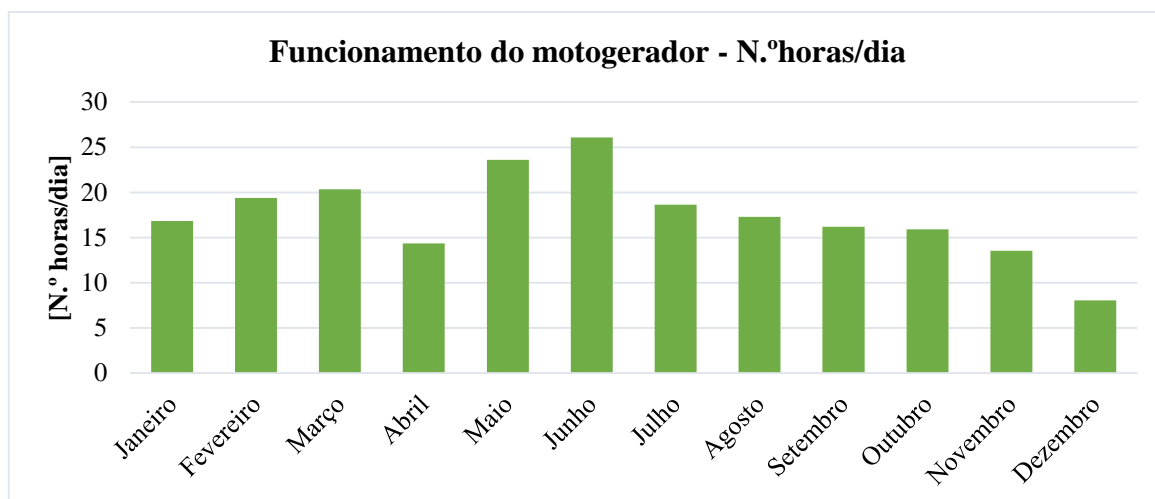
Com vista a obter uma valorização total do biogás, procedeu-se também ao cálculo do número de horas que os equipamentos utilizados teriam que funcionar para que todo o biogás produzido fosse consumido. Desta forma, numa primeira fase calculou-se o número de horas que um dos motogeradores da instalação de cogeração terá que funcionar para que todo o biogás produzido mensalmente seja consumido (tendo em consideração que este opera a carga parcial, devido a imposições legais de funcionamento). Assim, o número de horas que o motogerador deverá funcionar diariamente para um consumo de  $113 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , encontra-se especificado na *Fig. 36*.



**Figura 36 - Representação do número de horas/dia para consumo de todo o biogás por um motogerador.**

Pela *Fig. 36* é visível que o biogás se encontra disponível para que o motogerador esteja a operar em média 21h por dia, sendo notável a semelhança entre este gráfico e a *Fig.35*. Nos meses de Março, Maio e Junho o funcionamento do motogerador, tendo em consideração a produção de biogás para esses meses, excede as 24h. O que pressupõe que o motogerador tem condições para trabalhar 24 horas sob 24 horas durante os meses de Março, Maio e Junho, restando ainda um excedente de biogás passível de ser aproveitado.

Foi novamente realizado o cálculo acima descrito para o funcionamento em simultâneo de uma caldeira e de um motogerador, tendo novamente em consideração as imposições legais impostas ao motogerador, pelo que resulta um consumo total de 140 Nm<sup>3</sup>/h (113 Nm<sup>3</sup>/h atribuídos ao motogerador e 27 Nm<sup>3</sup>/h à caldeira). Desta forma, o número de horas de funcionamento que estes equipamentos têm que estar a funcionar para que todo o biogás produzido seja consumido encontra-se representado na *Fig. 37*.



**Figura 37 - Indicação do n.º de horas/dia de funcionamento do motogerador e caldeira.**

Pela *Fig.37* é visível uma diminuição do número de horas de funcionamento diárias atribuídas aos equipamentos, uma vez que também se verifica o aumento do consumo de energia primária. Assim, o valor médio de funcionamento é de 17 h/dia. No mês de Junho, face à elevada disponibilidade do biogás, o motogerador e a caldeira podem funcionar em simultâneo durante 24h sob 24h, existindo ainda uma pequena fração excedente de biogás passível de ser utilizada energeticamente.

Este cenário pressupõe uma produção inferior de energia elétrica, face ao cenário anteriormente exposto, mas em contrapartida prevê um aumento da produção da energia térmica uma vez que ao aproveitamento da energia proveniente do sistema de arrefecimento do motogerador e dos gases de escape existe ainda o acréscimo da energia térmica produzida na caldeira, pelo que ambos os cenários se revelam interessantes do ponto de vista energético.

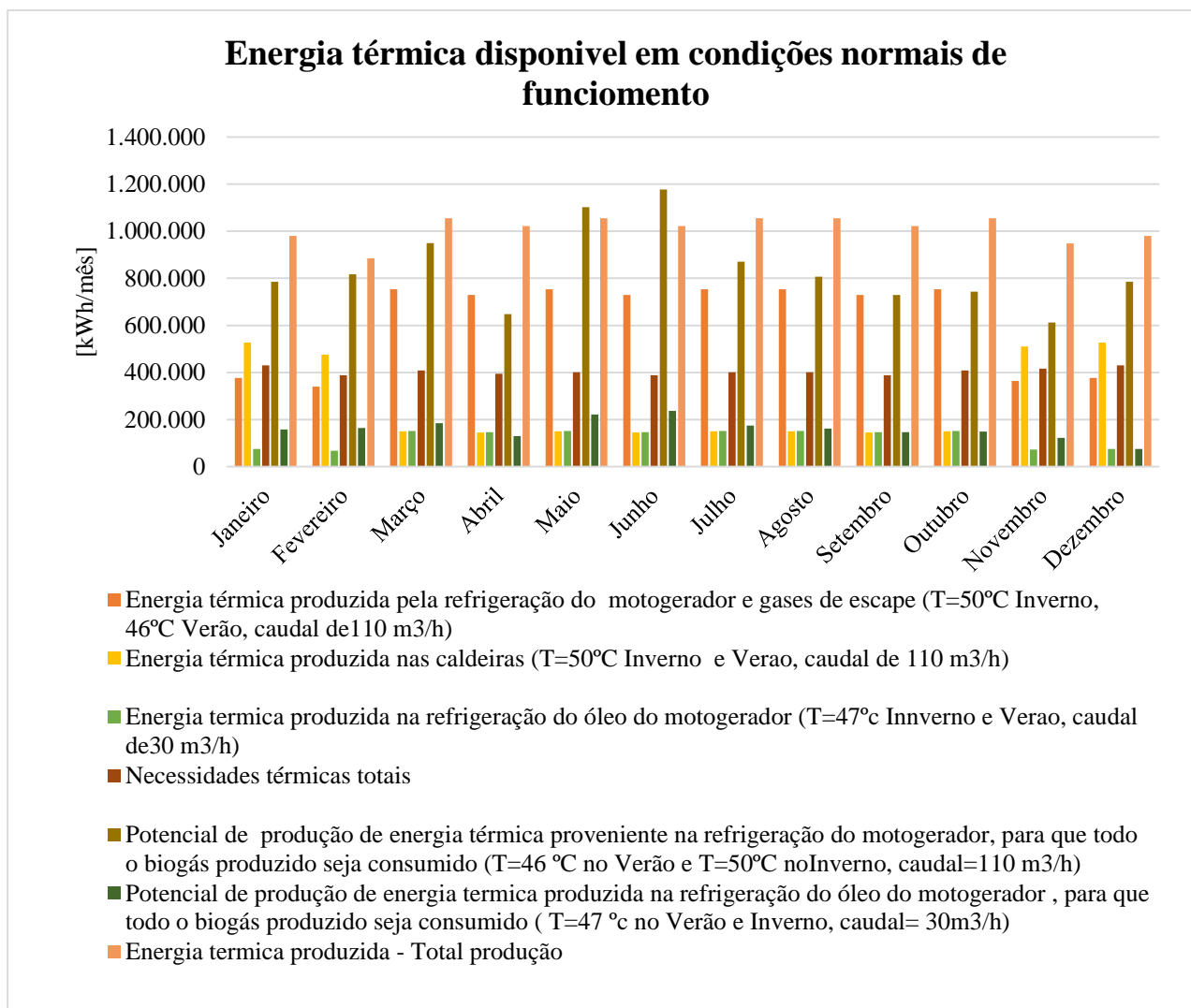
#### **3.2.4.4 Fluxo energético – energia térmica**

A energia térmica produzida na ETAR é proveniente das caldeiras e do sistema de cogeração (gases de escape, refrigeração do motogerador e refrigeração do óleo do motogerador).

Na *Fig. 38* encontram-se demonstrados todos os fluxos de energia térmica produzidos mensalmente durante o ano 2013, e os fluxos de energia térmica referentes às necessidades térmicas da ETAR.

Importa referir que, uma vez mais, os dados referentes à produção de energia térmica por parte do motogerador foram calculados tendo em consideração as condições normais de funcionamento, ou seja, tendo por base o tempo médio de funcionamento dos equipamentos. Onde o motogerador está programado para funcionar 10h/dia no Inverno e 20h no Verão, e a caldeira 14h nos meses de Inverno, e 4h/dia nos meses de Verão.

Relativamente aos imprevistos registados nos meses de Fevereiro, Abril e Dezembro, uma vez que foi considerado um ano atípico pelas avarias tidas nos motogeradores optou-se por considerar um ano médio, e não um ano com anomalias devidas a avarias.



**Figura 38 - Energia térmica disponível em condições normais de funcionamento.**

Pela *Fig.38* é evidente que a energia térmica produzida é na maioria dos meses proveniente do funcionamento do motogerador, com exceção dos meses de Inverno, onde os valores mais elevados para a produção de energia térmica se registaram nas caldeiras.

Nas restantes alturas do ano, as necessidades térmicas totais da ETAR, que se encontram associadas ao aquecimento dos digestores primários, a água para os banhos (ainda que esta seja apenas residual) e aquecimento do edifício foram supridas com recurso à energia térmica proveniente do funcionamento do motogerador e caldeiras, ao gás natural e à energia elétrica consumida da rede pública, respetivamente.

Relativamente às necessidades de energia térmica totais, estas apresentam um valor mais elevado nos meses de Inverno, cerca de 6%, relativamente aos meses de Verão.

Porém, e apesar da produção de energia térmica total proveniente das caldeiras e do funcionamento do motogerador se revelar mais do que suficiente para colmatar as necessidades térmicas da ETAR e para além do digestor possuir um isolamento térmico novo, não faz com que estas necessidades de aquecimento das lamas, e consequentemente dos digestores, sejam supridas, ou seja, apesar da energia térmica produzida face às necessidades se apresentar como mais do que suficiente, na prática isso não acontece.

Revelando-se um facto estranho, foram analisados os valores atribuídos às necessidades de aquecimento de cada um dos digestores e, consequentemente, do caudal de lamas dimensionado no projeto da ETAR (caudal esse superior ao que se verifica na realidade) e chegou-se à conclusão que o valor adotado para as necessidades de aquecimento por digestor está correto. Assim sendo, analisou-se a rede de tubagem de modo a validar o caudal de 110 m<sup>3</sup>/h, o que também se verificou. Pensa-se, portanto, que o problema deve estar no sistema de permuta, ou seja, averiguou-se que o permutador de calor circular de tipo espiral onde se efetua a troca de calor entre a água quente e as lamas ainda não tinha sido alvo de manutenção, pelo que, deve ser um facto a ter em consideração.

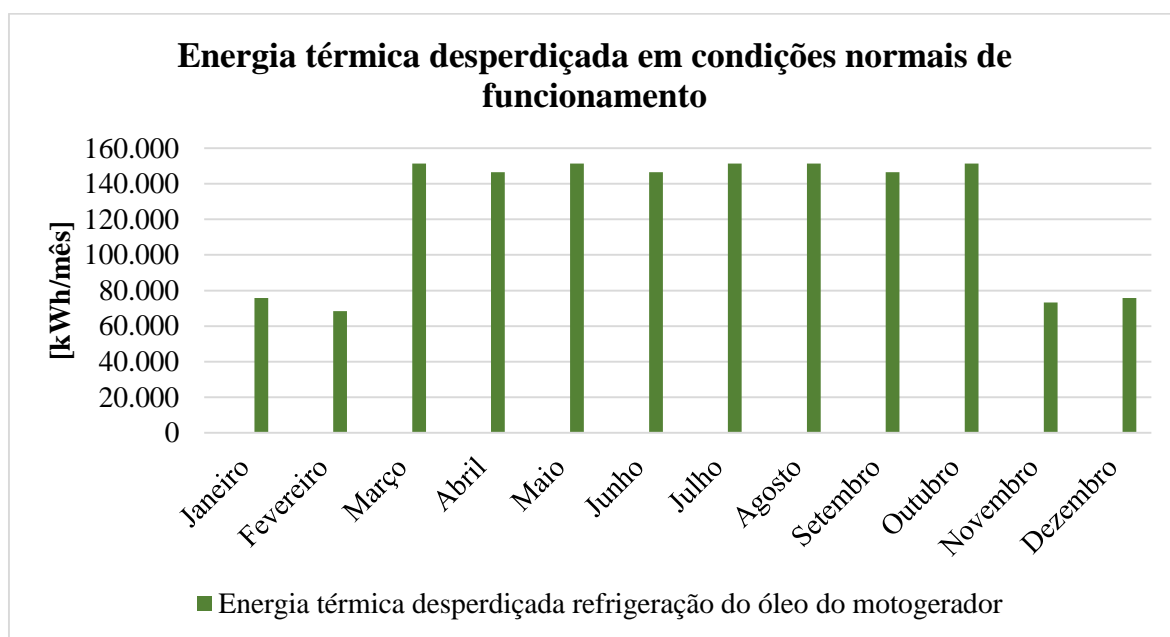
A ETAR Norte têm deste modo diversas dificuldades em manter as lamas a uma temperatura de 35°C, pelo que a temperatura real destas ronda os 33°C em meses de Inverno e, os 36°C nos meses de Verão.

A energia térmica gerada pela refrigeração do óleo do motogerador é totalmente desperdiçada, sem qualquer aproveitamento energético.



Comparando o cenário que contempla o potencial de produção de energia térmica no motogerador de modo a que todo o biogás produzido seja aproveitado face aos valores referentes à produção de energia térmica em condições normais de funcionamento (10h/dia no Inverno e 20h/dia no Verão), estes revelam-se superiores. Exceto durante o mês de Abril, devido a alterações no sistema de cogeração.

Na *Fig.39* encontram-se representados estes desperdícios ao longo dos meses do ano de 2013.



**Figura 39 - Representação gráfica da energia térmica desperdiçada. [25]**

Na ETAR Norte a energia proveniente da refrigeração do óleo do motogerador não possui qualquer aproveitamento energético, sendo totalmente desperdiçada.

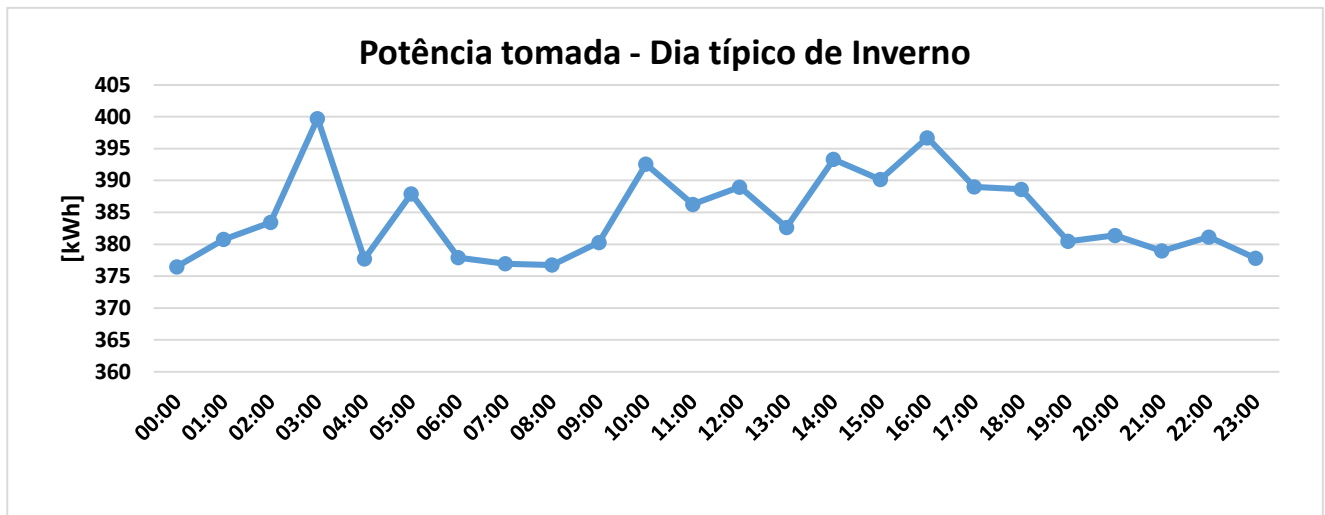
Já a energia térmica produzida nas caldeiras, existente nos gases de escape do motogerador e sistema de arrefecimento do motogerador é totalmente aproveitada para aquecimento das lamaz, pelas razões anteriormente mencionadas.

### **3.2.5 Compilação de dados para um dia típico de Inverno e Verão**

Este subcapítulo segue as mesmas diretrizes, e conseqüentemente os mesmos objetivos, que o subcapítulo 3.1.5 realizado para a ETAR Sul. Deste modo, à semelhança do que foi feito para a ETAR Sul, também para a ETAR Norte se elaborou uma tabela diária, minuto a minuto, que engloba todos os equipamentos consumidores de energia elétrica

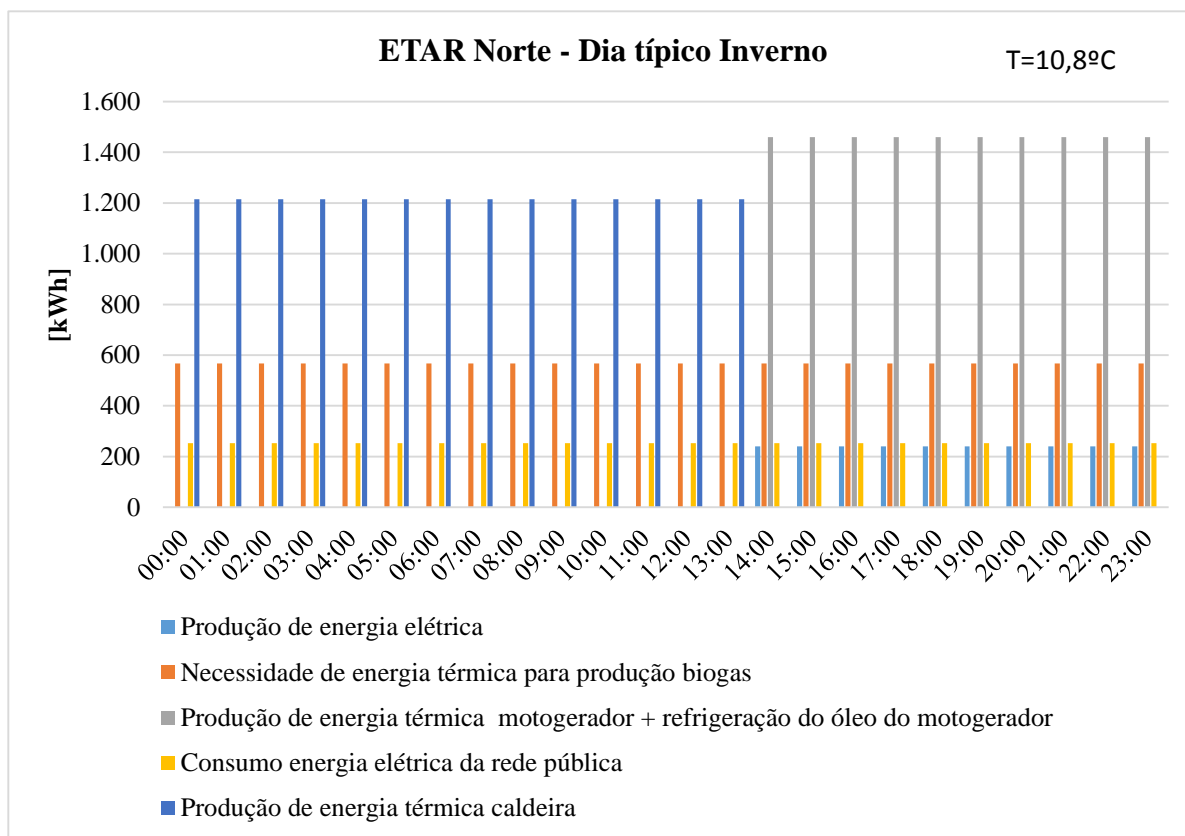
intrínsecos à ETAR. Através desta monitorização, que engloba mais de 100 equipamentos, com a maioria a ligar e desligar minuto a minuto, foi possível determinar as variações presentes nas diversas alturas do dia, e que são referentes às necessidades energéticas e térmicas da ETAR.

Desta forma, e numa primeira fase, para um dia típico de Inverno o perfil diário de potência elétrica tomada ao longo do dia encontra-se representado na *Fig. 40*.



**Figura 40- Potência elétrica tomada na ETAR Norte, para um dia típico de Inverno. [25]**

Pela *Fig.40*, é visível que o consumo energético é bastante variável. Desta forma, e tendo por objetivo quantificar e analisar os fluxos energéticos da ETAR para um dia típico de Inverno, considerou-se um dia do mês de Janeiro, em que a temperatura média do ar é de 10,8°C, encontrando-se os respetivos fluxos representados na *Fig.41* e na *Tabela 7*.

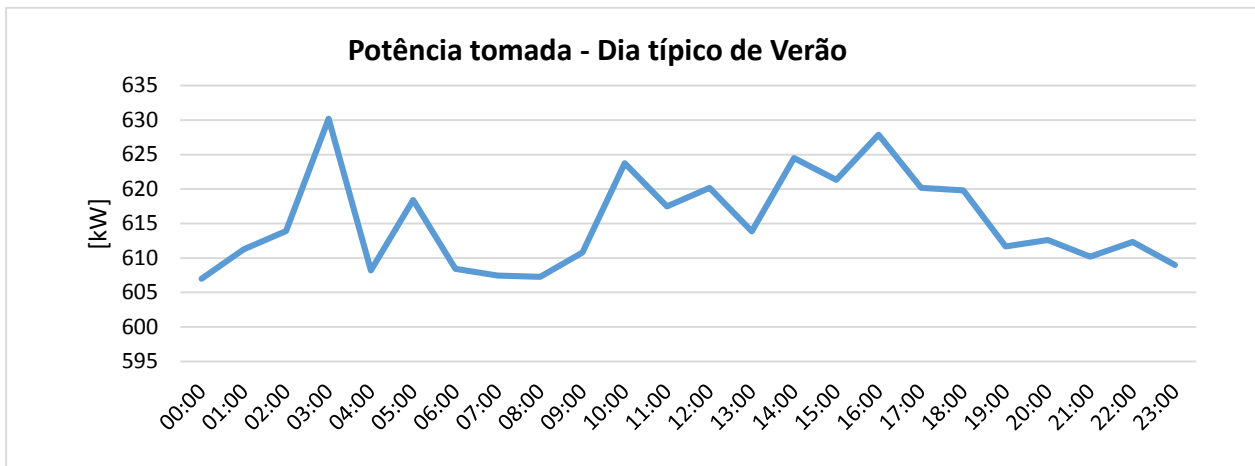


**Figura 41 - Fluxos Energéticos inerentes um dia típicos de Inverno.**

**Tabela 7 - Quantificação dos fluxos energéticos.**

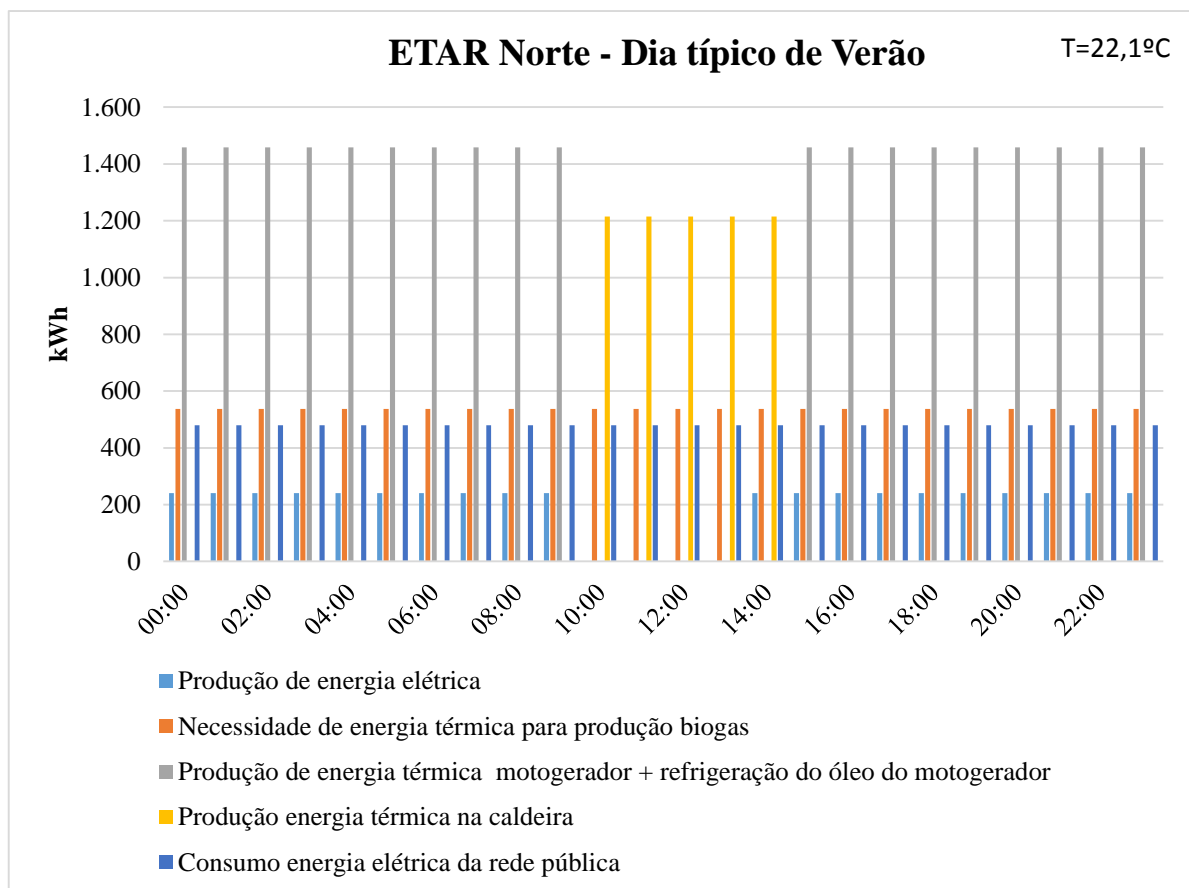
Variável	Valor [kWh]
Produção de energia elétrica	240
Consumo energia elétrica da rede pública	253
Necessidade de energia térmica produção biogás	567
Produção energia térmica motogerador + refrigeração do óleo motogerador	1.459
Produção energia térmica caldeira	1.215

Para um dia típico de Verão, o perfil diário de potência elétrica tomada encontra-se representado na *Fig. 42*.



**Figura 42 - Perfil diário de potência elétrica tomada na ETAR Norte para um dia típico de Verão.**

De maneira a caracterizar os fluxos energéticos da ETAR para os meses considerados como meses de Verão, estes encontram-se representados na *Fig.43* e na *Tabela 8*, onde se optou por escolher, uma vez mais, um dia do mês de Agosto, em que a temperatura média do ar ronda os 22,1 °C.



**Figura 43 - Fluxos energéticos de um dia típico de Verão.**

**Tabela 8 - Quantificação dos fluxos energéticos para um dia típico de Verão. [25]**

<b>Variável</b>	<b>Valor [kWh]</b>
Produção Energia Elétrica	240
Consumo Energia Elétrica Rede Publica	479
Necessidade Energia Térmica Produção Biogás	537
Produção Energia Térmica Motogerador + Refrigeração do óleo Motogerador	1.459
Produção Energia Térmica Caldeira	1.215

Comparando um dia típico de Inverno com um dia típico de Verão, as maiores diferenças centram-se no consumo de energia elétrica que é significativamente mais elevado para um dia típico de Verão do que para um dia típico de Inverno, 479 kWh e 253 kWh, respetivamente. Este aumento do consumo da energia elétrica tem associado o aumento do funcionamento das turbinas do tratamento biológico da água residual, inerente ao tratamento biológico do caudal afluyente referido no subcapítulo anterior.

A produção horária de energia elétrica mantém-se constante tanto para meses de Inverno como para meses de Verão – 240 kWh.

No que concerne às necessidades de energia térmica do digestor primário, estas apresentam um valor mais baixo em meses de Verão, 537,5 kWh, do que em meses de Inverno, 567 kWh, uma vez que nos meses mais quentes a temperatura média do ar é mais elevada e, consequentemente, a temperatura do esgoto também.

Já a produção horária de energia térmica na caldeira, no motogerador e presente na água de refrigeração do óleo é igual tanto para meses de Verão como para os meses de Inverno, uma vez que o diferencial térmico e o caudal mássico de água da água são não variam.

## **4. Proposta de melhoria**

Este último capítulo tem como intuito apresentar e enumerar algumas propostas de melhoria interna e externa, que contemplam o aproveitamento total da parcela de energia que é gerada nas ETAR Norte e Sul mas que não é aproveitada nas condições atuais. Estas observações têm em consideração as análises realizadas aos fluxos energéticos para o ano de 2013, e que se encontram no capítulo 3, e respetivos subcapítulos.

Desta forma, enunciam-se algumas medidas que visam a total valorização dos fluxos energéticos produzidos: biogás e energia térmica. Relativamente à energia elétrica produzida não serão apresentadas propostas, uma vez que os motogeradores se encontram limitados por condicionalismos legais, a uma produção máxima de 250 kWh. Para além disso, a energia elétrica produzida é facilmente vendida, e não há propostas de melhorias a este respeito exceto que deve ser tirado o maior proveito do biogás para a sua produção.

Para que cada ETAR consiga alcançar uma eficiência energética máxima a partir do uso racional e total dos fluxos energéticos produzidos, interessa a total valorização do biogás, uma vez que a produção de energia elétrica no motogerador, que utiliza como energia primária o biogás, deve ser a máxima possível, tendo em consideração a disponibilidade deste recurso energético em cada ETAR.

Importa referir que o objetivo das medidas posteriormente enunciadas visa apenas o aproveitamento total da energia gerada, não contemplando a atual legislação portuguesa (se existente) relativamente ao aproveitamento energético por parte das empresas, uma vez que é um tema que foge ao âmbito deste trabalho.

### **4.1 Proposta de melhoria – Caso de estudo A – ETAR Sul**

A ETAR Sul revela-se um bom caso de estudo no que concerne ao aproveitamento e consequente valorização da energia que é produzida numa ETAR, e que é passível de ser aproveitada.

Enumeram-se de seguida algumas propostas de melhoria que visam a valorização total dos fluxos energéticos mencionados anteriormente.

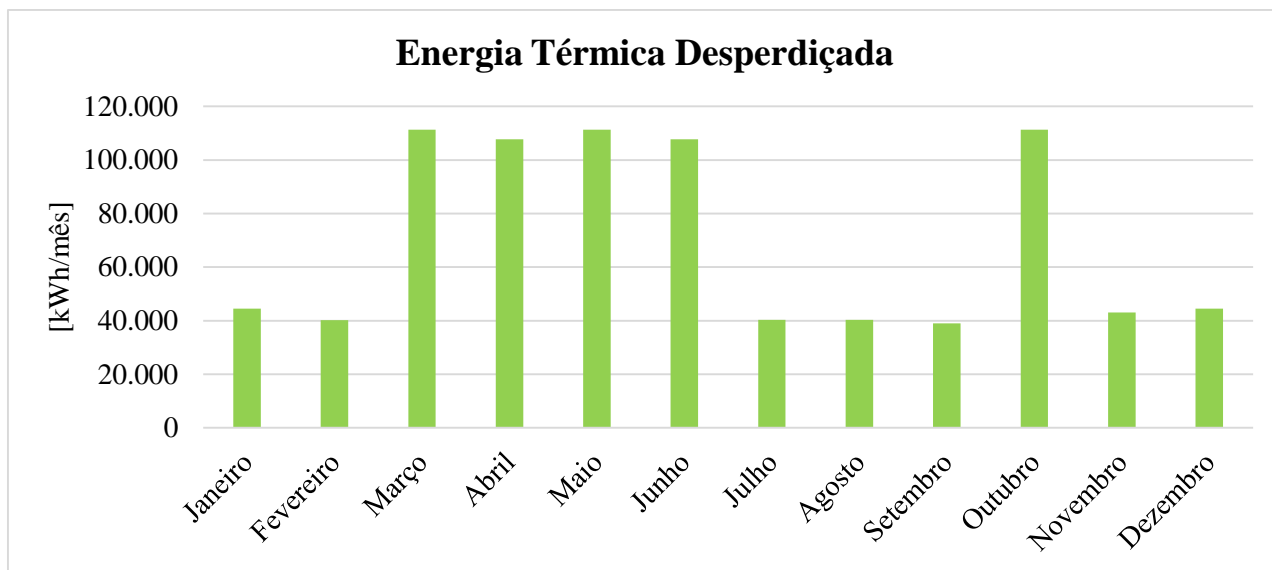
#### 4.1.1 Fluxo energético – energia térmica

A ETAR Sul produz mais energia térmica do que aquela que necessita para colmatar as suas necessidades térmicas (este fluxo só é utilizado para suprir as necessidades de aquecimento do digestor primário e consequentemente aquecer as lamas digeridas, tal como referido anteriormente). Esta energia térmica restante não é aproveitada.

Assim, e de maneira a quantificar os desperdícios de energia térmica para o ano de 2013 estes são apresentados de seguida na *Tabela 9* e na *Fig. 44*.

**Tabela 9 - Energia térmica desperdiçada no ano de 2013 na ETAR Sul.**

<b>Meses</b>	<b>Energia térmica desperdiçada [kWh/mês]</b>
<b>Janeiro</b>	44.536
<b>Fevereiro</b>	40.226
<b>Março</b>	111.279
<b>Abril</b>	107.689
<b>Maio</b>	111.279
<b>Junho</b>	107.689
<b>Julho</b>	40.371
<b>Agosto</b>	40.371
<b>Setembro</b>	39.069
<b>Outubro</b>	111.279
<b>Novembro</b>	43.099
<b>Dezembro</b>	44.536



**Figura 4294 - Energia térmica desperdiçada na ETAR Sul.**

Tendo em consideração os valores apresentados anteriormente, e relembrando que derivam da associação da energia térmica proveniente da água de refrigeração do óleo do motogerador, da água de refrigeração do motogerador e dos gases de escape tal como referido no Capítulo 3.

Importa referir que a ETAR possui ainda necessidades térmicas relativas ao balneário (água quente para banhos) e para aquecimento do edifício de exploração nos meses mais frios (de Outubro a Abril). Necessidades essas que estão a ser colmatadas com recurso ao gás natural para aquecer a água dos banhos e à energia elétrica para manter os aquecedores ligados (dado o ambiente corrosivo da ETAR, o sistema de climatização não funciona porque os equipamentos se encontram corroídos). Posto isto, o desperdício de energia térmica poderia ser utilizado para uso interno o que ajudaria a suprir estas necessidades.

De seguida apresenta-se a *Tabela 10* que quantifica as necessidades de energia térmica do balneário e do edifício de exploração. Esta tabela tem como objetivo realçar a fração de energia térmica desperdiçada que poderia ser utilizada para colmatar estas necessidades. Para além disso é também possível quantificar a energia restante que ainda é suscetível de ser utilizada.



**Tabela 10 - Quantificação das necessidades térmicas da ETAR Sul e da energia térmica desperdiçada que se encontra disponível para possível aproveitamento interno na ETAR.**

Meses	Necessidades de energia térmica - balneário (kWh/mês)	Necessidades de energia térmica - climatização do edifício (kWh/mês)	Necessidades de Energia térmica total - balneário e climatização do edifício (kWh/mês)	Energia térmica desperdiçada na refrigeração do motogerador + gases de escape (kWh/mês)	Energia térmica desperdiçada na refrigeração do óleo do motogerador (kWh/mês)
<b>Janeiro</b>	293	7.634	7.927	4.165	40.372
<b>Fevereiro</b>	265	6.896	7.160	3.762	36.465
<b>Março</b>	293	7.634	7.927	70.908	40.372
<b>Abril</b>	284	7.388	7.672	68.621	39.069
<b>Maió</b>	293	0	293	70.908	40.372
<b>Junho</b>	284	0	284	68.621	39.069
<b>Julho</b>	293	0	293	0	40.372
<b>Agosto</b>	293	0	293	0	40.372
<b>Setembro</b>	284	0	284	0	39.069
<b>Outubro</b>	293	7.634	7.927	70.908	40.372
<b>Novembro</b>	284	7.388	7.672	4.031	39.069
<b>Dezembro</b>	293	7.634	7.927	4.165	40.372

Através da *Tabela 10* é visível que as necessidades térmicas do balneário e de climatização do edifício ficam colmatadas durante o ano inteiro caso se opte por suprir essas necessidades com a energia térmica gerada na ETAR, proveniente dos processos de refrigeração do motogerador e gases de escape e da energia térmica proveniente da água de refrigeração do óleo do motogerador. Neste caso optou-se por escolher que essas necessidades ficassem preenchidas com o recurso à energia térmica disponível na água de refrigeração do óleo do motogerador que se encontra disponível a uma temperatura de 50°C com um caudal de 16 m<sup>3</sup>/h. A climatização do edifício só é necessária, por norma, de Outubro a Abril, dado que durante esses meses ainda é ligado o aquecimento. Nos restantes meses a ventilação natural com recurso às janelas do edifício de exploração é suficiente para haver conforto térmico no local de trabalho. Importa ainda referir que os valores das

potências de climatização do edifício foram retirados do projeto de climatização e englobam as 8h de trabalho diário, todos os dias de cada mês. Esta energia térmica disponível na água de refrigeração e que poderia ser utilizada para suprir as necessidades internas da ETAR podia ser armazenada num reservatório de água quente por forma a acomodar diferentes tempos de disponibilidade e consumo desta energia.

A restante energia térmica poderá ser utilizada para consumo externo, ou seja, poderiam ser celebrados contratos de compra e venda entre a SIMRIA e outras empresas que precisassem de energia térmica a baixa temperatura. Na *Tabela 11* encontra-se resumida a energia térmica que ainda é desperdiçada (que “sobra”) depois de ser aproveitada uma pequena fração para suprir as necessidades internas de climatização e aquecimento de água para os banhos.

**Tabela 11 - Energia térmica restante na ETAR Sul no ano de 2013.**

<b>Meses</b>	<b>Energia térmica restante - refrigeração óleo do motogerador [kWh/mês]</b>	<b>Energia térmica restante - refrigeração do motogerador + gases de escape [kWh/mês]</b>
<b>Janeiro</b>	32.444	4.165
<b>Fevereiro</b>	29.304	3.762
<b>Março</b>	32.444	70.908
<b>Abril</b>	31.398	68.621
<b>Maio</b>	40.079	70.908
<b>Junho</b>	38.786	68.621
<b>Julho</b>	40.079	0
<b>Agosto</b>	40.079	0
<b>Setembro</b>	38.786	0
<b>Outubro</b>	32.444	70.908
<b>Novembro</b>	31.398	4.031
<b>Dezembro</b>	32.444	4.165

Com o intuito de toda a energia térmica gerada ser utilizada/valorizada, tendo em consideração que a água de refrigeração do óleo se encontra à temperatura de 50°C com um caudal de 16 m<sup>3</sup>/h, e a refrigeração do motogerador a uma temperatura de 53°C no Verão e 63°C no Inverno, com um caudal de 110 m<sup>3</sup>/h (inclui gases de escape nos meses de Inverno. Nos meses de Verão estes são enviados para a atmosfera sem qualquer aproveitamento). São exceção os meses de Julho, Agosto e Setembro, em que o caudal é

reduzido em 40 %, tal como referido no Capítulo 3. Assim, são dados exemplos de empresas onde seria possível fornecer/vender essa energia:

- As piscinas de Ílhavo que se encontram a cerca de 2 km da ETAR Sul. Precisam de manter a água entre os 28-29°C. Caso a energia térmica proveniente da ETAR Sul não se revelar suficiente para colmatar as necessidades de aquecimento das piscinas, esta poderia ser utilizada como uma etapa de pré-aquecimento da água. Assim, a energia primária necessária para elevar a temperatura da água das piscinas até aos 29°C irá ser menor.
- Na indústria de secagem do bacalhau. Existindo uma unidade fabril deste tipo situada na Zona Industrial da Mota, tal como a ETAR Sul, onde a temperatura do processo de secagem do bacalhau não deve exceder os 26/28°C. Desta forma, a energia térmica poderia ser utilizada para aquecimento/manutenção. [26]
- Na indústria da secagem de madeira a baixa temperatura, em que a temperatura requerida para este processo varia entre os 30-50°C. De igual modo, se a energia térmica disponibilizada pela ETAR não se mostrar suficiente para atender às necessidades térmicas deste processo, pode funcionar para suprir as necessidades energéticas de uma etapa de pré-aquecimento. [27]

Importa referir que não se tiveram em consideração as imposições legais, caso existam, para este tipo de compra e venda de energia térmica, ou seja, admitiu-se que todas as conjunturas anteriormente referidas são exequíveis de serem realizadas.

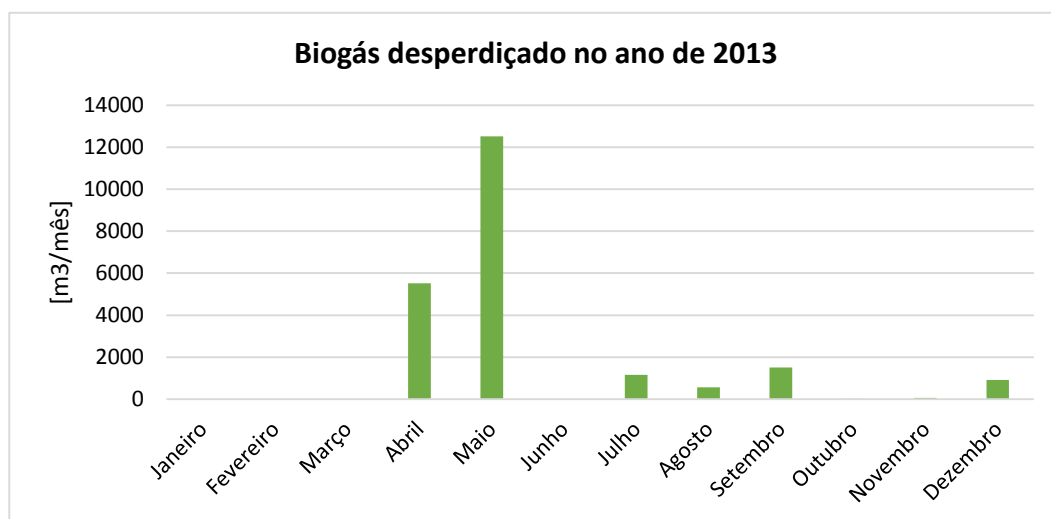
#### **4.1.2 Fluxo energético – biogás**

O biogás produzido na ETAR Sul é quase, na sua totalidade utilizado no motogerador. Contudo, em alguns meses, por motivos processuais, a sua utilização no motogerador ou nas caldeiras não correspondeu ao total da sua produção. Deste modo, existe uma fração deste combustível que é encaminhada para a tocha para ser queimado, não existindo desta forma qualquer tipo de aproveitamento energético inerente.

A partir da *Tabela 12* e da *Fig. 45*, é possível visualizar a quantidade biogás mensalmente enviada para a tocha.

**Tabela 12 - Biogás encaminhado para a tocha na ETAR Sul no ano 2013.**

Meses	Nm <sup>3</sup> /mês
Janeiro	0
Fevereiro	0
Março	0
Abril	5.523
Maio	12.523
Junho	0
Julho	1.161
Agosto	569
Setembro	1.503
Outubro	16
Novembro	55
Dezembro	910



**Figura 45 – Biogás desperdiçado na ETAR Sul.**

Como medida proposta seria interessante conceber uma tubagem que tivesse ligação direta à rede de gás natural ou a um reservatório de armazenamento de biogás, para

que este, em condições de não poder ser utilizado no motogerador, não fosse imediatamente encaminhado para a tocha para ser queimado. Hoje em dia já existem tecnologias de “purificação” do biogás que originam o bio metano, um combustível limpo que pode substituir o gás natural nas suas aplicações comuns. Este tipo de tecnologia já é utilizado em países como a Dinamarca. [28]

Poderia ser ainda opção colocar na ETAR Sul uma estação de abastecimento de veículos cujo motor esteja preparado para utilizar este combustível como energia primária.

Uma outra proposta seria medir quanto biogás se perde atualmente no depósito tampão (sem cobertura), ou seja, conhecer qual o teor de biogás contido nas lamas digeridas assim que estas deixam o digestor primário e que poderia ser delas extraído. Este estudo permitiria conhecer a viabilidade de adaptar o atual depósito tampão, a um digestor secundário por forma a obter um aproveitamento total do biogás.

## **4.2 Proposta de melhorias – Caso de Estudo B – ETAR Norte**

Para a ETAR Norte, só serão apresentadas as medidas de aproveitamento energético que diferem das enunciadas para a ETAR Sul, de maneira a não replicar informação e tornar a leitura fastidiosa.

Posto isto, enumeram-se de seguida algumas propostas de melhoria que visam, uma vez mais, a valorização total dos fluxos energéticos mencionados anteriormente.

### **4.2.1 Fluxo energético – energia térmica**

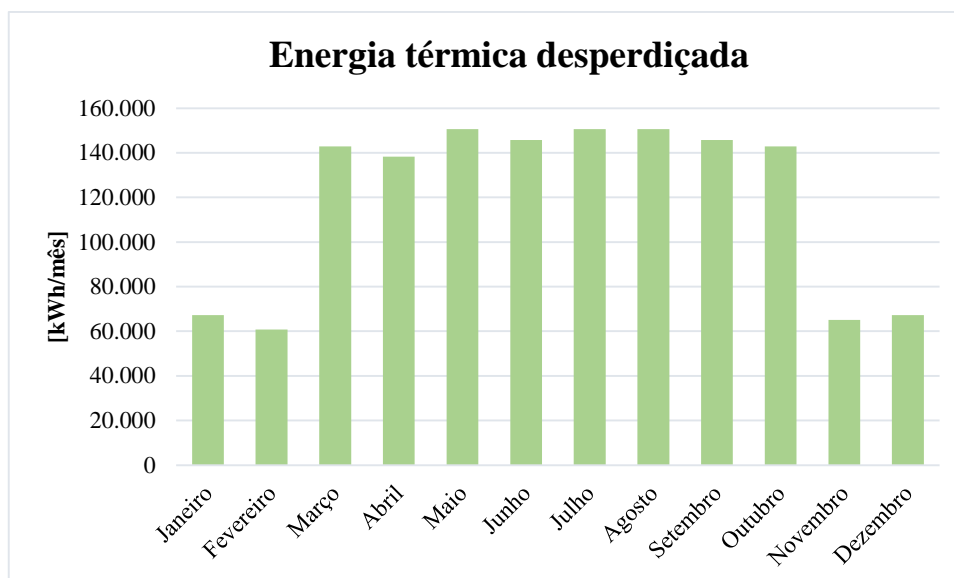
Relativamente à energia térmica produzida na ETAR Norte, e como referido na análise descrita no Capítulo 3 (e respetivos subcapítulos), apesar da produção de energia térmica gerada nas caldeiras e na água de refrigeração do motogerador se revelar suficiente para colmatar as necessidades de energia térmica do digestor primário (aquecimento das lamas), tal não se verifica. Isto é, o sistema de permuta de calor da ETAR Norte em condições normais de operação tem dificuldade em satisfazer as necessidades térmicas do digestor. Posto isto, talvez o sistema de permuta térmica não esteja a desempenhar a sua função nas condições de operação desejadas, pelo que a energia térmica referida anteriormente, apesar de se quantificar como um valor bastante superior ao valor das

necessidades de aquecimento, não foi considerada como um desperdício uma vez que é aproveitada na totalidade.

Contudo, também na ETAR Norte este vetor energético produzido na refrigeração do óleo do motogerador não é aproveitado, revelando-se o único fluxo de energia térmica desperdiçado. Assim, de maneira a quantificar o desperdício de energia térmica para o ano de 2013, este apresenta-se sumarizado na *Tabela 13* e na *Fig. 46*.

**Tabela 13 - Energia térmica desperdiçada no ano de 2013.**

<b>Meses</b>	<b>Energia térmica desperdiçada [kWh/mês]</b>
<b>Janeiro</b>	75.696
<b>Fevereiro</b>	68.371
<b>Março</b>	151.393
<b>Abril</b>	146.510
<b>Maio</b>	151.393
<b>Junho</b>	146.510
<b>Julho</b>	151.393
<b>Agosto</b>	151.393
<b>Setembro</b>	146.510
<b>Outubro</b>	151.393
<b>Novembro</b>	73.255
<b>Dezembro</b>	75.696



**Figura 46 - Energia térmica desperdiçada no ano 2013. [25]**

Tendo em consideração os valores apresentados anteriormente, e relembrando que a ETAR Norte, à semelhança da ETAR Sul, também possui necessidades de energia térmica, que se prendem com o aquecimento da água para os banhos do balneário e aquecimento do edifício de exploração que estão a ser colmatadas com recurso ao gás natural e à energia elétrica, respetivamente (dado o ambiente corrosivo da ETAR, o sistema de climatização não funciona porque se encontra corroído).

Desta forma, o desperdício de energia térmica proveniente da refrigeração do óleo do motogerador poderia ser utilizado para uso interno, o que ajudaria a satisfazer estas necessidades.

Deste modo, apresentam-se na *Tabela 14* as necessidades térmicas do balneário e do edifício de exploração (por falta de informação admitiu-se que o edifício de exploração da ETAR Norte possui as mesmas necessidades de energia térmica que o edifício de exploração da ETAR Sul).

**Tabela 14 - Quantificação das necessidades térmicas da ETAR Norte e da energia térmica desperdiçada que se encontra disponível para possível aproveitamento interno na ETAR.**

Meses	Necessidades energia térmica - climatização do edifício [kWh/mês]	Necessidades de energia térmica - Balneário [kWh/mês]	Necessidades de energia térmica total - climatização do edifício e balneário [kWh/mês]	Energia térmica desperdiçada refrigeração do óleo do Motogerador
<b>Janeiro</b>	7.634	845	8.479	75.696
<b>Fevereiro</b>	6.896	763	7.659	68.371
<b>Março</b>	7.634	845	8.479	151.393
<b>Abril</b>	7.388	818	8.206	146.510
<b>Maio</b>	0	845	845	151.393
<b>Junho</b>	0	818	818	146.510
<b>Julho</b>	0	845	845	151.393
<b>Agosto</b>	0	845	845	151.393
<b>Setembro</b>	0	818	818	146.510
<b>Outubro</b>	7.634	845	8.479	151.393
<b>Novembro</b>	7.388	818	8.206	73.255
<b>Dezembro</b>	7.634	845	8.479	75.696

Através da *Tabela 14* acima apresentada é perceptível que as necessidades térmicas do balneário e de climatização do edifício ficam supridas durante o ano inteiro caso se opte por utilizar a energia térmica proveniente da refrigeração do óleo do motogerador. Importa assim referir que esta energia se encontra disponível na água de refrigeração do óleo do motogerador à temperatura de 47°C, com um caudal de 30 m<sup>3</sup>/h (durante o horário de funcionamento do motogerador). Já a climatização do edifício só é necessária, por norma, de Outubro a Abril, dado que é durante esses meses que se ligam os aquecedores.

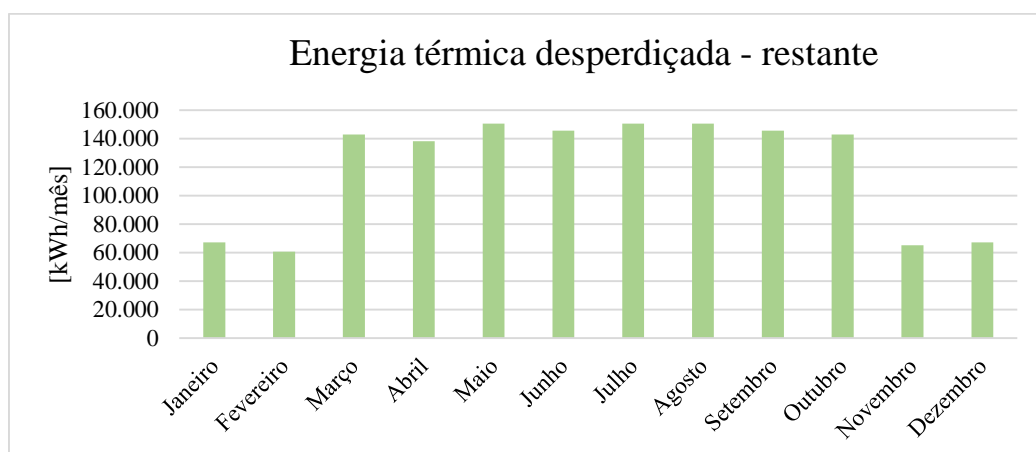
Para a energia térmica restante as medidas propostas são as mesmas que as adotadas no subcapítulo 4.1 para a ETAR Sul.

Desta forma, a fração de energia térmica restante passível de ser utilizada, depois de colmatadas as necessidades térmicas da ETAR encontra-se representada na *Tabela 15*.



**Tabela 15 - Energia térmica restante na ETAR Norte no ano de 2013.**

Meses	Energia térmica Restante - Refrigeração Óleo do Moto gerador (kWh/mês)
<b>Janeiro</b>	67.217
<b>Fevereiro</b>	60.712
<b>Março</b>	142.914
<b>Abril</b>	138.304
<b>Maio</b>	150.548
<b>Junho</b>	145.692
<b>Julho</b>	150.548
<b>Agosto</b>	150.548
<b>Setembro</b>	145.692
<b>Outubro</b>	142.914
<b>Novembro</b>	65.049
<b>Dezembro</b>	67.217



**Figura 46 – Energia térmica restante na ETAR Norte.**

### 4.2.3 Fluxo energético – biogás

A gestão deste recurso energético - o biogás difere de ETAR para ETAR, ou seja, quase todos os meses, por motivos processuais, na ETAR Norte uma parcela deste combustível é queimada na tocha, não existindo qualquer tipo de aproveitamento energético desta queima.

A partir da *Tabela 16* e da *Fig. 47* é possível visualizar a quantidade de biogás mensalmente enviada para a tocha.

**Tabela 16 - Biogás encaminhado para a tocha na ETAR Norte no ano 2013.**

Meses	Nm <sup>3</sup> /mês
Janeiro	0
Fevereiro	4.772
Março	3.120
Abril	3.868
Maio	5.643
Junho	8.693
Julho	2.708
Agosto	1.568
Setembro	2.106
Outubro	1.951
Novembro	119
Dezembro	0



**Figura 47 - Biogás encaminhado para a tocha na ETAR Norte no ano 2013.**

De modo a aproveitar na totalidade o biogás produzido, as medidas propostas para a ETAR Norte são as mesmas que as enunciadas para a ETAR Sul, descritas no subcapítulo 4.1.



## 5. Conclusões e propostas de trabalhos futuros

Espera-se que o consumo de energia a nível mundial triplique até ao ano de 2050. É por isso necessário investir na redução das emissões de gases de efeito de estufa, na integração das energias renováveis e no aumento da eficiência energética sendo, a cogeração aliada à valorização energética do biogás produzido nas ETAR um contributo para estes requisitos. [12] Assim, é imprescindível que a política energética dê especial atenção à utilização racional e eficiente da energia, favorecendo a implementação de projetos que contribuam para uma melhoria da produção e eficiência energética, como é o caso da cogeração.

De um modo geral, pode dizer-se que o objetivo de avaliar e analisar os fluxos energéticos existentes na ETAR Sul e Norte, a fim de conhecer a capacidade que as ETAR possuem em relação à produção de diversas formas de energia, os modos de aproveitamento e, conseqüente valorização inerentes, e tendo ainda como finalidade a proposta de melhorias, foi alcançado.

A ETAR Sul comparativamente à ETAR Norte surge como um exemplo de boa gestão do biogás, utilizando este recurso energético praticamente na sua totalidade para produzir energia elétrica por via de um sistema de cogeração. A energia elétrica produzida é vendida na totalidade à rede elétrica nacional.

Apesar de a ETAR Norte produzir mais biogás, uma vez que o volume de lamas processadas é bastante superior, apresenta uma gestão deficiente deste recurso energético, encaminhando biogás para a tocha quase todos os meses. Para além disso, ainda compra gás natural a um comercializador para colmatar as necessidades de aquecimento dos digestores primários. Interessa, portanto, a sensibilização dos gestores da ETAR relativamente a esta problemática.

Relativamente à energia térmica produzida nas instalações de cogeração de cada ETAR, esta só é utilizada para suprir as necessidades térmicas do processo de digestão das lamas (produção de biogás). Assim, só uma pequena fração desta energia térmica produzida e disponível é utilizada. Assim, deve-se equacionar o aproveitamento dessa

energia térmica para aproveitamento interno e externo, sendo exemplos o aquecimento de água para banhos e o aquecimento dos edifícios.

Analogamente, o aproveitamento total dos fluxos energéticos produzidos nas ETAR torna-se imperativo!

Em virtude dos factos apresentados, é ainda de conhecimento geral que a fatura energética constitui um peso significativo nos custos de funcionamento das empresas, e as ETAR não são exceção, com custos de energia elétrica na ordem dos 13.858 €/mês e 25.164 €/mês, para as ETAR Sul e Norte, respetivamente.

A estratégia energética da União Europeia reflete estas questões (Commission of the European Communities, 2006), e tem como objetivos: [2]

- Reduzir o impacto ambiental da produção e da utilização de energia;
- Promover a poupança da energia e a eficiência energética;
- Aumentar a cota de produção e utilização de energia mais limpa.

A escassez de recursos endógenos conduz o nosso país a uma elevada dependência energética do exterior, que se traduz numa maior vulnerabilidade do sistema energético às oscilações dos preços internacionais. [29] Deste modo, e através da implementação de medidas robustas para o aproveitamento total dos fluxos de energia produzidos nas ETAR evolui-se no sentido de alcançar estes objetivos. Assim, e como trabalho futuro, é de todo o interesse analisar e estudar a viabilidade de implementação das medidas propostas no Capítulo 5 (e outras). Não só nas ETAR estudadas, mas em todas as ETAR do país.

Neste contexto, a produção de energia elétrica e térmica a partir do biogás produzido nas ETAR vai ao encontro da necessidade de promover a sua produção, contribuindo esta exploração para a proteção do ambiente e para o desenvolvimento sustentável do país.

O aumento da utilização de energias renováveis revela-se imprescindível, não só por questões de natureza ambiental mas também de natureza económica. É nesse sentido que a utilização da biomassa como fonte de energia deve ser equacionada e fomentada, pois, para além de, por essa via, se incrementar o desenvolvimento das empresas, constitui uma fonte de rendimento alternativa. [2]

## 6. Bibliografia

- [1] Rocha, C. (2012), “Auditorias Energéticas: Eficiência, Redução de Custos e Competitividade nas empresas” *Industria e Ambiente*, 75,29-31.
- [2] Venkatesh, G., Elmi, C. R. (2013). “Economic - Environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digester in WWTPs (Wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway)”. *Energy*, 58, 220 - 235.
- [3] Veerapen, J., Beereport, M. (2011), “Co-generation and Renewables – Solutions for a low – carbon energy future”. *International Energy Agency*, 4 - 8.
- [4] Seadi, T., Rutz, D. (2008), “Biogas Handbook”. *University of Southern Denmark Esbjerg*,
- [5] ERSAR, "Quem somos - Apresentação da ERSAR", acessado a Fevereiro de 2014 em: <http://www.ersar.pt/>
- [6] Simões, C., Rosmaninho, I., Henriques, A.G.,(2008), "Guia para a Avaliação de Impacte das Estações de Tratamento de Águas Residuais". *Agência Portuguesa do Ambiente*.
- [7] SIMARSUL, "Aproveitamento energético do biogás ", acessado a Março de 2014 em: <http://www.simarsul.pt>
- [8] Gerardi, M. H. (2003), " The microbiology of anaerobic digesters". Wiley Interscience.
- [9] AGENEAL (2005), "ELAC - Estratégia Local para as Alterações Climáticas". *Departamento de Estratégia e Gestão Ambiental Sustentável - Câmara Municipal de Almada*.

- [10] Rulkens, W. (2008), "Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options". *Energy and Fuel*, 22, 9 - 15.
- [11] Moreira, F. J. (2012/2013). "Análise dos problemas associados ao destino final de lamas em ETARs e desenvolvimento de metodologias para otimização dos processos utilizados". *Tese de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal).
- [12] COGEN, "O que é a cogeração" acedido a Janeiro de 2014 em: <http://www.cogenportugal.com>
- [13] Li, H., Marechal, F., Fravat, D., (2010), "Power and cogeneration technology environomic performance typication in the context of CO2 abatement part II: Combined heat and power cogeneration". *Energy*, 35, 3517 - 3523
- [14] Neto, F., (2013), "Apontamentos da Disciplina de Conversão de Energias Convencionais", DEM-UA, Universidade de Aveiro
- [15] Ertesvag, I., (2007), " Efficiencies and Indicators defined to promote combined heat and power". *Energy Conversion and Management*, 48, 1004 - 1015.
- [16] Frangopoulos, C. A., (2012), "A method to determine the power to heat ratio, the cogenerated electricity and the primary energy savings of gogeneration system after the European Directive". *Energy*, 45, 52 - 61.
- [17] Cengel, Y., Boles, M. (2011), "Termodinâmica" (5ªed.). *MC Grawhill*.
- [18] Martins, J. (2011), "Motores de Combustão Interna" (3ª ed.). *PUBLI INDUSTRIA*.
- [19] Comissão Europeia, (2004). *Directiva 2004/8/CE*.

- [20] Verbruggen, A., Dewallef, P.,(2013), "Unveiling the mystery of combined Heat and Power (cogeneration). *Energy*, 30, 1 - 8.
- [21] Costa, V. A. (2013), "Apontamentos da Disciplina de Transporte e Armazenamento de Energia", *DEM-UA, Univerddidade de Aveiro*.
- [22] Pridesa, (2000), "Especificações Técnicas das ETAR SUL e NORTE", Aveiro (Portugal).
- [23] SIMRIA, (2013) "ETAR Sul - Estação de Tratamento de Àguas Residuais Sul". Aveiro (Portugal).
- [24] Águas de Portugal (2010), "Relatório Técnico N.º 1.- SIMRIA- OPTIMIZAÇÃO DIGESTÃO". Aveiro (Portugal).
- [25] SIMRIA, (2013) "ETAR Norte - Estação de Tratamento de Àguas Residuais Norte". Aveiro (Portugal).
- [26] Henriques, A. (2008). "Optimização da Secagem de Produtos Agroalimentares". Tese de Mestrado, *Universidade de Aveiro*, Aveiro (Portugal).
- [27] Montana. (2014), " Guia da Madeira - Razões para secar a madeira Guia da Madeira".
- [28] sysadvance. (2014), "Sysadvance is getting green with METHAGEN". *Sysadvance*
- [29] ADENE, "Política Energética", acedido em Julho de 2014, em: <http://www.adene.pt>
- [30] Faria, R. J. L. (2000). "CLIMATIZAÇÃO E VENTILAÇÃO DOS EDIFÍCIOS - PROJECTO DE EXECUÇÃO ETAR SUL". *Energia Técnica*



## Anexo 1

### Cálculo da electricidade produzida em cogeração

Os valores utilizados para o cálculo da electricidade produzida em cogeração serão determinados com base no funcionamento esperado ou efectivo da unidade em condições normais de utilização. No caso das unidades de micro-cogeração, o cálculo pode basear-se em valores certificados.

- a) A electricidade produzida em cogeração será considerada igual à produção de electricidade anual total da unidade medida à saída dos geradores principais:
- i) nas unidades de cogeração de tipo b), d), e), f), g) e h) referidas no anexo I, com uma eficiência anual global definida pelos Estados-Membros a um nível de pelo menos 75 %, e
  - ii) nas unidades de cogeração de tipo a) e c) referidas no anexo I, com uma eficiência anual global definida pelos Estados-Membros a um nível de pelo menos 80 %.
- b) Nas unidades de cogeração com uma eficiência anual global inferior ao valor referido na subalínea i) da alínea a) [unidades de cogeração de tipo b), d), e), f), g) e h) referidas no anexo I] ou com uma eficiência anual global superior ao valor referido na subalínea ii) da alínea a) [unidades de cogeração de tipo a) e c) referidas no anexo I], a cogeração é calculada de acordo com a seguinte fórmula:

$$E_{\text{cog}} = H_{\text{cog}} \cdot C$$

em que:

$E_{\text{cog}}$  é a quantidade de electricidade produzida em cogeração

$C$  é o rácio electricidade/calor

$H_{\text{cog}}$  é a quantidade de calor útil produzida em cogeração (calculada para o efeito como produção total de calor, deduzindo o calor que seja eventualmente produzido em caldeiras separadas ou por extracção de vapor vivo do gerador de vapor antes da turbina).

O cálculo da electricidade produzida em cogeração deve basear-se no rácio efectivo electricidade/calor. Se o rácio efectivo electricidade/calor de uma unidade de cogeração não for conhecido, podem ser utilizados, nomeadamente para fins estatísticos, os seguintes valores implícitos para as unidades de cogeração de tipo a), b), c), d) e e) referidas no anexo I, desde que a electricidade produzida em cogeração assim calculada seja igual ou inferior à produção total de electricidade da unidade:

Tipo de unidade	Rácio implícito electricidade/calor, C
Turbinas de gás em ciclo combinado com recuperação de calor	0,95
Turbinas a vapor de contrapressão	0,45
Turbinas de condensação com extracção de vapor	0,45
Turbinas de gás com recuperação de calor	0,55
Motores de combustão interna	0,75

Se os Estados-Membros introduzirem valores implícitos para os rácios electricidade/calor das unidades de tipo f), g), h), i), j) e k) referidas no anexo I, esses valores implícitos serão publicados e notificados à Comissão.

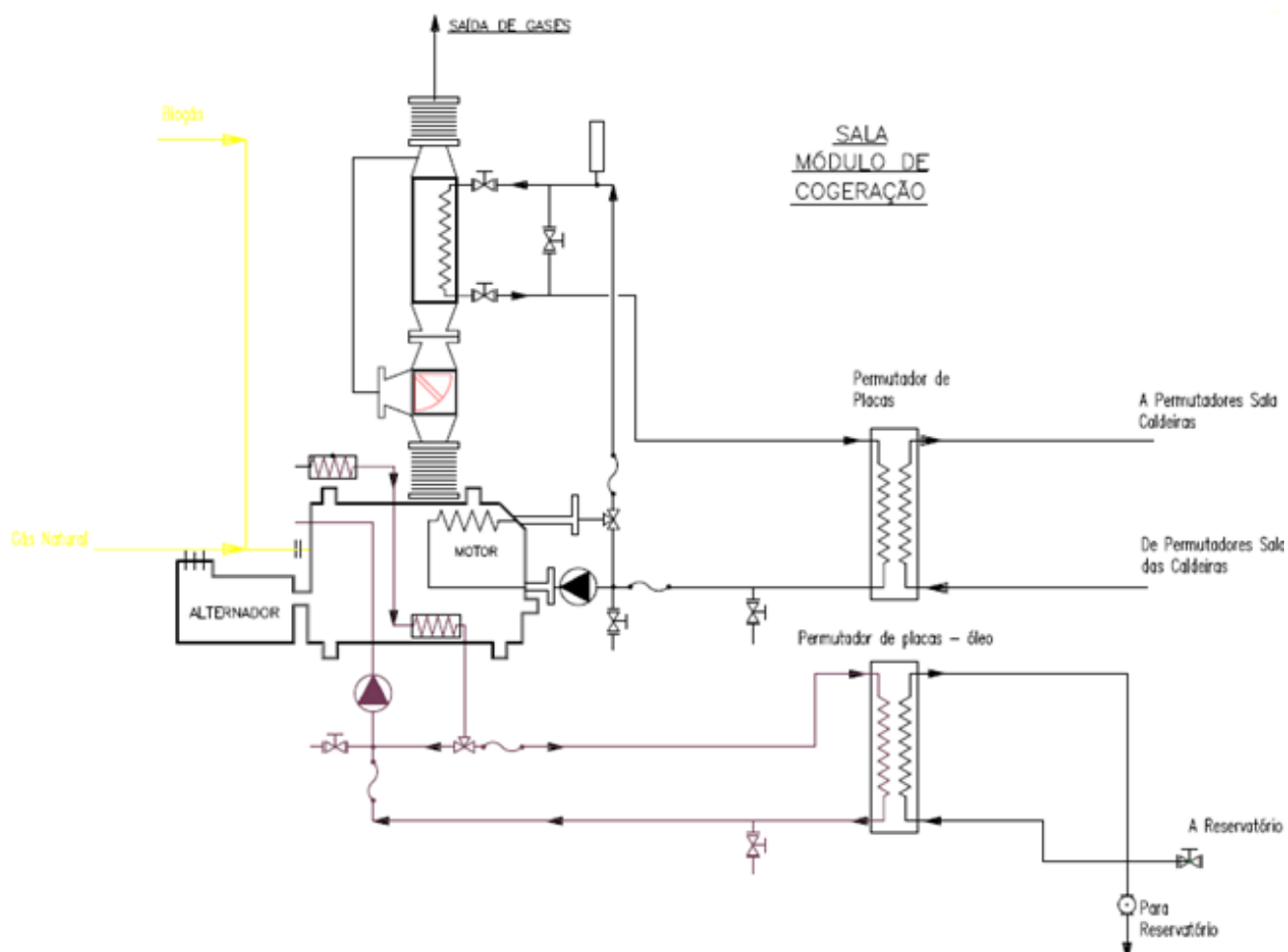
- c) Se uma parte do conteúdo energético do combustível utilizado no processo de cogeração for recuperada em produtos químicos e reciclada, essa parte pode ser subtraída do consumo de combustível antes do cálculo da eficiência global utilizado nas alíneas a) e b).
- d) Os Estados-Membros podem determinar que o rácio electricidade/calor é o rácio entre a electricidade e o calor útil em modo de cogeração a baixa capacidade, calculado a partir dos dados operacionais da unidade específica.
- e) A Comissão estabelecerá, nos termos do n.º 2 do artigo 14.º, orientações circunstanciadas para efeitos de implementação e aplicação do anexo II, incluindo a determinação do rácio electricidade/calor.
- f) Os Estados-Membros podem aplicar uma periodicidade diferente da anual para efeitos dos cálculos a efectuar nos termos das alíneas a) e b).

## Anexo 2

Encontra-se representado o esquema de princípio do sistema de cogeração da ETAR Sul, (sala do motogerador).

Relativamente ao sistema de cores adotado: as linhas a amarelo simbolizam as tubagens de biogás e de gás natural. A válvula de 3 vias situada na caldeira de recuperação de gases encontra-se representada por uma linha rosa escuro, a tracejada. As restantes linhas a preto perfazem o circuito da permuta de calor da água de refrigeração do motogerador e gases de escape. Neste esquema também se encontra exibida a água de refrigeração do óleo do motogerador (representada pela cor castanha).

Não se optou por colocar escala no desenho por terem sido realizados diversos *zooms* à imagem para esta se tornar perceptível.

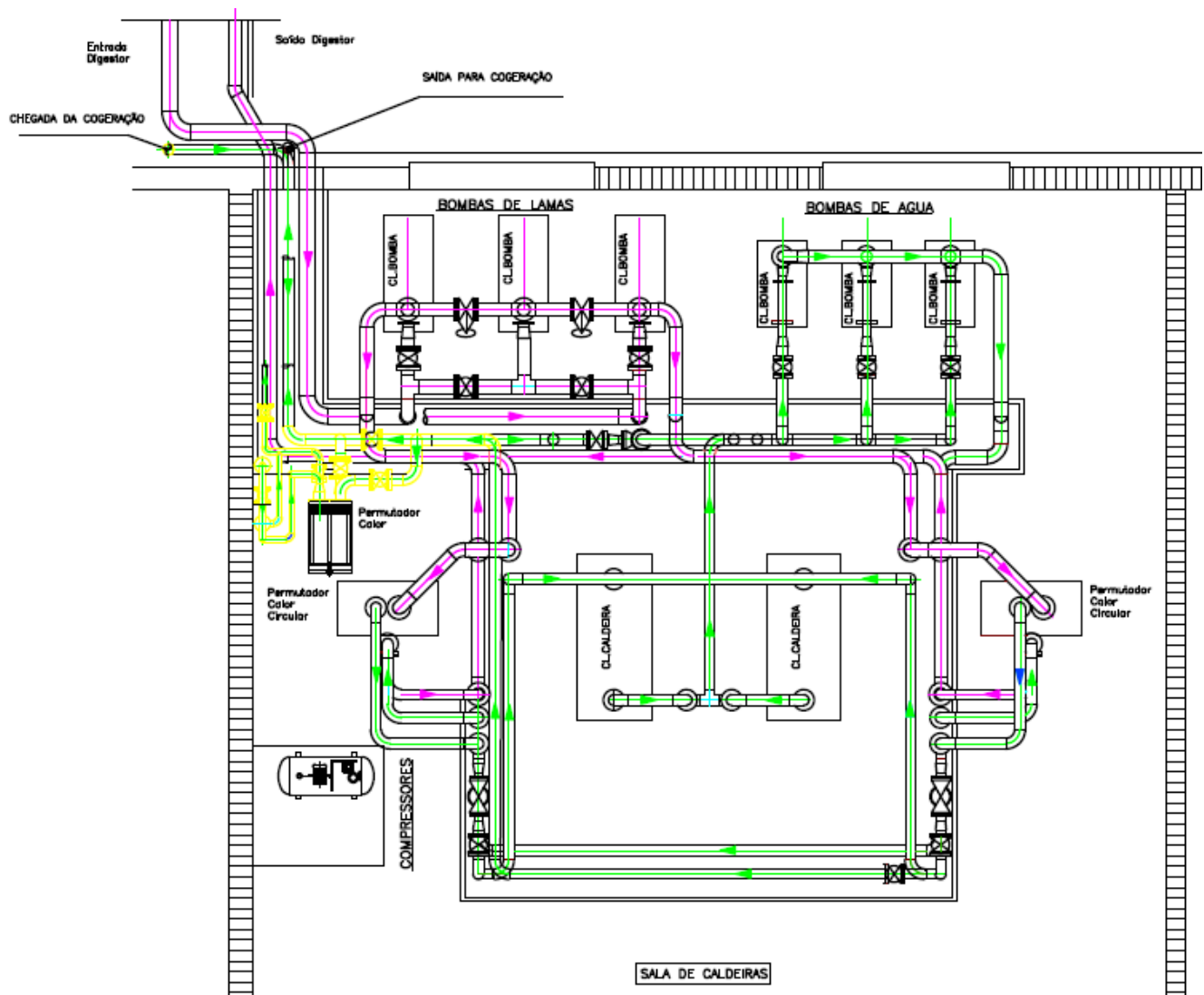


### **Anexo 3**

Encontra-se representado o esquema de princípio da instalação onde se dá a troca térmica entre as lamas e a energia térmica recuperada na ETAR Sul (sala das caldeiras).

De modo a caracterizar os diversos fluxos de água quente e lamas digeridas foram atribuídas cores aos trajetos efetuados por cada um deles. Desta forma, o fluxo que se encontra a representado pela cor magenta simboliza as lamas digeridas e o seu respetivo percurso de aquecimento, bem como o trajeto de chegada das lamas e de envio aos digestores, antes e após o seu aquecimento nos permutadores de calor circulares. A verde, o percurso da água quente proveniente do permutador de placas que se encontra na sala do motogerador (cogeração) e o respetivo trajeto de troca de calor nos permutadores circulares e o respetivo regresso à sala do motogerador. A tubagem a amarelo representa o circuito que a água quente (também proveniente do permutador de calor de placas da sala dos motogeradores) realiza quando se encontra a uma temperatura demasiado elevado, sendo assim encaminhada para o permutador de calor de placas situado na sala das caldeiras para dissipar energia térmica.

Não se optou por colocar escala no desenho por terem sido realizados diversos *zooms* à imagem para esta se tornar perceptível.



$\dot{m}_{\text{água de aquecimento das lamas}} = 75 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $\Delta T = 7^\circ\text{C}$

## Anexo 4

Relativamente à produção de energia térmica da ETAR há a considerar a (água quente proveniente da água de refrigeração do motogerador e gases de escape, a água quente proveniente da refrigeração do óleo do motogerador e a água quente proveniente da queima de combustível nas caldeiras). Considera-se a variação da massa volúmica da água e da pressão dentro das tubagens praticamente nula, para o intervalo de temperaturas entre 15° a 60°C (variação de temperaturas sofrida pela água na ETAR), e assim o  $m^3$  é aproximadamente igual ao  $Nm^3$  para a água. Assim, para a massa volúmica,  $\rho$ , utilizou-se o valor de 1.000 [kg/m<sup>3</sup>] e para o calor específico a pressão constante,  $c_p$ , 4.186 [J/kg °C]. [21]

Para os cálculos referentes à energia térmica produzida, esta foi calculada à entrada do permutado de placas circular.

Na fórmula utilizada onde era requerida a utilização da temperatura média do ar para cada mês, optou-se por utilizar os valores reais da temperatura média verificada para cada mês do ano de 2013, tendo os seus valores sido retirados do *site* do Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

O modo de cálculo efetuado para identificar a produção e as necessidades de energia térmica são de seguida apresentados:

- Energia térmica produzida pela refrigeração do motogerador e aproveitamento dos gases de escape (este último só é contabilizado nos meses de Inverno) para a ETAR Sul:

Recordando  $\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T$  [J/s], e utilizando como exemplo de cálculo um dia do mês de Janeiro de 2013, tem-se:

$$\rho_{H_2O} \approx 1.000 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$c_{p_{H_2O}} = 4,186 \text{ [kJ/Kg}^\circ\text{C]}$$

$$\dot{v} = 75 \text{ [m}^3\text{/h]}$$

$$\eta_{\text{Permutador circular}} = 95\%$$

$$\Delta T = 7^\circ\text{C}$$

Pelo que,

$$\dot{Q} = 75 \times 1000 \times 4,186 \times (7)$$

$$\dot{Q} = 2197650 \text{ [kJ/h]}$$

Sabendo que 1 hora tem 3600 segundos, ao dividirmos o resultado por 3600, temos o resultado expresso em [kJ/s], que por sua vez, corresponde a [kW].

Desta forma, e multiplicando o resultado por 10 horas (corresponde ao tempo de funcionamento do motogerador), e pelo número de dias de cada mês (como se escolheu o mês de Janeiro multiplicou-se por 31 dias), obtém-se o resultado final em [kWh/mês]. Temos, portanto:

$$\dot{Q} = (((75 \times 1.000 \times 4,186 \times (7))/3.600) \times 10 \times 31) \times 0,95$$

$$\dot{Q} = 179.780 \text{ kWh/mês}$$

Nota: Para o cálculo da energia térmica produzida a partir das caldeiras e da água de refrigeração do óleo do motogerador, o método de cálculo é o mesmo, para as duas ETAR, (varia o caudal de água de ETAR para ETAR como referido no capítulo 3 e respetivos subcapítulos).

## Anexo 5

Para calcular as necessidades de aquecimento das águas quentes sanitárias do balneário - banhos, isto é, para determinar a quantidade de gás natural necessária para aquecer a massa de água utilizada diariamente foram realizados os cálculos seguintes.

- Massa de água utilizada mensalmente (estimativa) para a ETAR Sul:

Por dia tomam banho 7 pessoas na ETAR. No entanto, os chuveiros possuem redutor de caudal, pelo que se estima que poupe 40 % do caudal de água utilizado por banho. Deste modo, e admitindo que cada pessoa gasta 60 litros de água por banho tomado, com o redutor passa a gastar 36 litros:

$$\begin{aligned} \text{Água utilizada por banho} \times \text{Percentagem de redução} &= \text{Poupança de água} \\ 60 \times 0,4 &= 24 \text{ l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Água utilizada por banho} - \text{Poupança de água} &= \text{Água efetivamente gasta} \\ 60 - 24 &= 36 \text{ l} \end{aligned}$$

Como por dia 7 pessoas tomam banho, ao multiplicar o valor da “Água efetivamente gasta” por 7, resulta que, por dia, são gastos 252 litros de água nos banhos da ETAR.

$$\begin{aligned} \text{Água efetivamente gasta} \times N.^\circ \text{ pessoas} \\ 36 \times 7 &= 252 \text{ l} \approx 0,252 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Multiplicando o valor obtido ( $0,252 \text{ m}^3$  de água) pelo número de dias de cada mês, obteve-se o valor do volume de água gasto mensalmente. Por exemplo, para o mês de Janeiro (possui 31 dias) obteve-se:

$$\begin{aligned} \text{Água efetivamente gasta por dia} \times N.^\circ \text{ dias do mês} \\ 0,252 \times 31 &= 7,812 \text{ m}^3/\text{mês} \end{aligned}$$

- Quantidade necessária de gás natural que tem que ser absorvida pela massa de água para elevar a sua temperatura média de 30°C.

- Recordando  $\dot{Q} = \dot{m} \times cp \times \Delta T$  [J/s], e utilizando os seguintes dados, tem-se:

$$\rho_{H_2O} \approx 1.000 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$\eta_{\text{Esquentador}} = 95\%$$

$$\dot{v} = 7,812 \text{ [m}^3\text{/mês]}$$

$$\rho_{\text{Gás natural}} \approx 0,63 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$PCI_{\text{gás natural}} = 39.900 \text{ [J/Kg]}$$

$$Cp_{H_2O} = 4.186 \text{ [J/Kg}^\circ\text{C]}$$

- Pelo que a energia absorvida pela massa de água mensalmente é de:

$$Q = 7,812 \times 1000 \times 4.186 \times (30)$$

$$Q = 981.030.960 \text{ [J/mês]}$$

$$Q \approx 981.030 \text{ [kJ/mês]}$$

- Dividindo o valor obtido pelo rendimento do esquentador obteve-se o valor real da energia que é necessário fornecer para aquecer a massa de água:

$$Q = \frac{981.030,960}{0,93} \text{ [kJ/mês]}$$

$$Q = 1.054.872 \text{ [kJ/mês]}$$

- Dividindo o valor anteriormente obtido pelo valor do Poder Calorífico Inferior do gás natural, obteve-se a quantidade de gás natural necessário para aquecer a massa de água utilizada para os banhos.

$$m_{\text{gás natural}} = \frac{1.054.872}{39.900}$$

$$m_{\text{gás natural}} = 26,43 \text{ [Kg/mês]}$$

, que dividido pela densidade do gás natural:

$$V_{\text{gás natural}} = \frac{126,43}{0,63}$$

$$V_{\text{gás natural}} = 41,96 \text{ m}^3$$

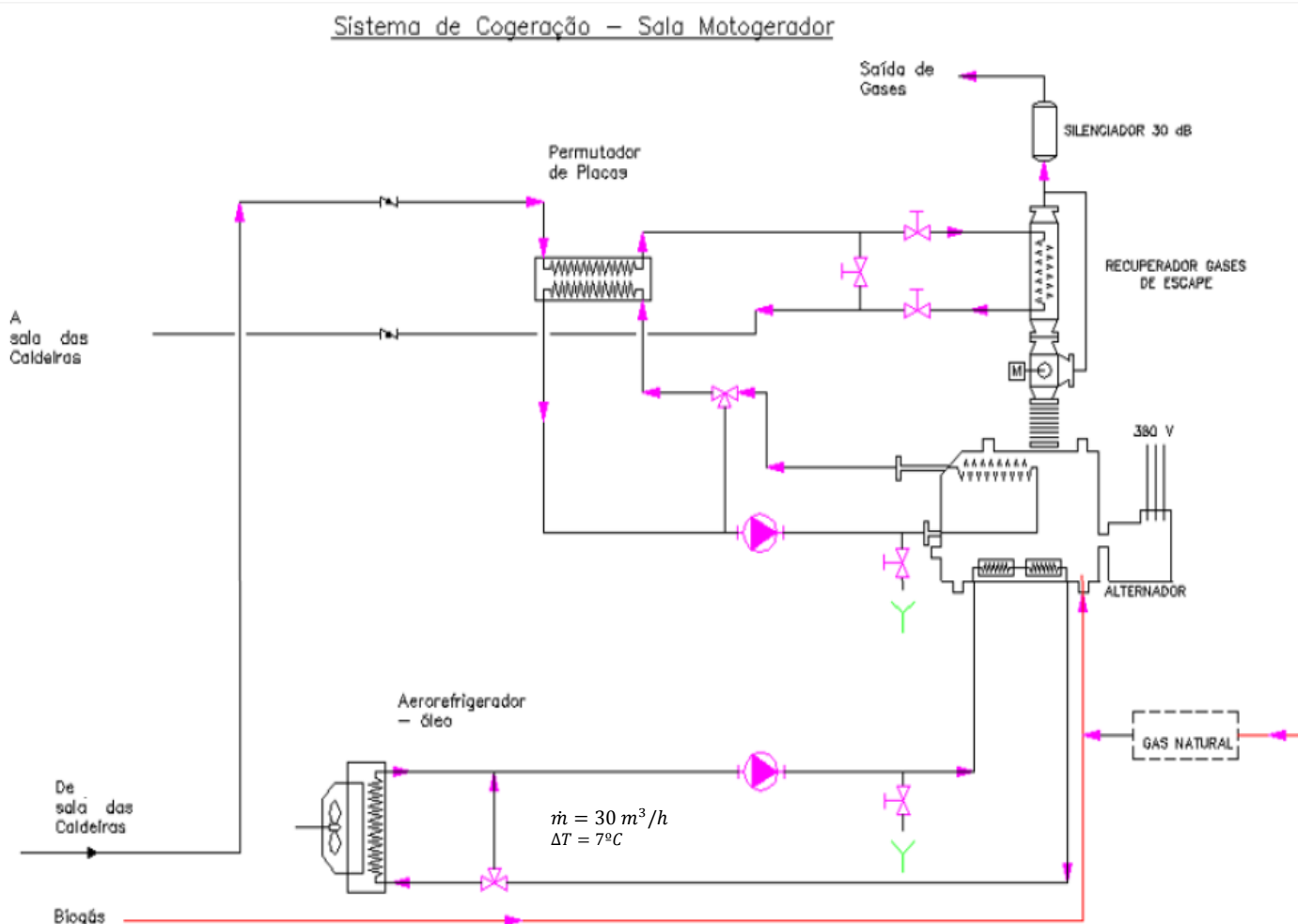


## Anexo 6

Encontra-se representado o esquema de princípio do sistema de cogeração da ETAR Norte, (sala do motogerador).

Relativamente ao sistema de cores adotado: as linhas a vermelho claro simbolizam as tubagens de biogás e de gás natural. As restantes linhas a preto perfazem o circuito da permuta de calor da água de refrigeração do motogerador e gases de escape. Neste esquema também se encontra representada a água de refrigeração do óleo do motogerador (representada pela cor preta).

Não se optou por colocar escala no desenho por terem sido realizados diversos *zooms* à imagem para esta se tornar perceptível.



*água de aquecimento das lamas* =  $110 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$